

HEA Group Colloquium
May 7, 2020

**Revealing the Origins of
Violent Stellar Transients from
Fast Radio Bursts and Magnetars**

SHOTARO YAMASAKI



● FRB に関する研究

- FRBの可視光母銀河探査 (2016-)
- FRBガンマ線対応放射の探査 (2015-2016)
- **FRB-連星中性子星合体モデルの検証と拡張 (2016-2017)**
- FRB の母銀河内位置分布の理論計算 (2018-)
- FRB による銀河系内バリオン探査 (2019-)
- **FRB による中性子星状態方程式の制限 (2020-)**
- Galactic FRB (2020-)

● 強磁場中性子星(マグネター)に関する研究

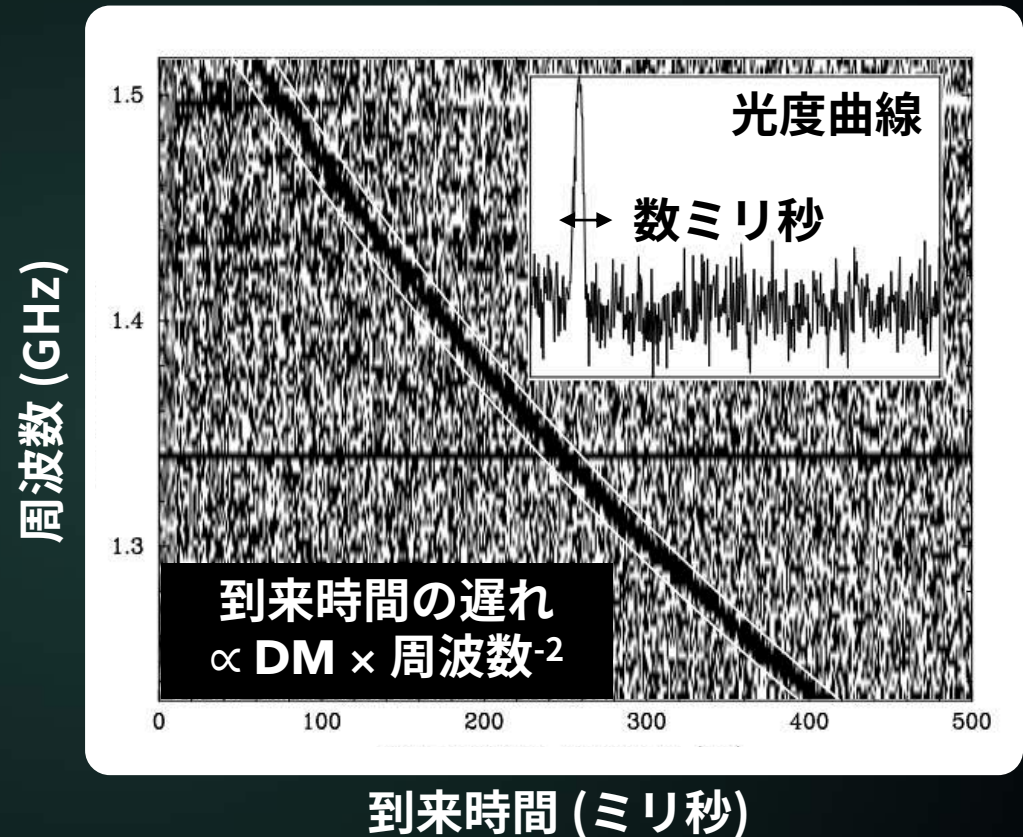
- **中性子星フレアと電波放射の関係 (2018-)**
- **マグネターフレアの放射機構 (2019-)**
- 銀河系外マグネターフレア (2020-)

The image depicts a radio astronomy observatory at night. In the foreground, several large, white, wire-mesh parabolic radio telescope dishes are silhouetted against a dark, star-filled sky. The dishes are of various sizes and are mounted on complex metal structures. A prominent, bright purple streak of light, representing a Fast Radio Burst (FRB), cuts across the sky from the upper left towards the center. The streak has a jagged, irregular appearance, suggesting a rapid change in frequency or direction. The background is filled with numerous small, distant stars, creating a sense of vastness and cosmic scale. The overall color palette is dominated by the dark blues and blacks of the night sky, contrasted with the bright white of the dishes and the vibrant purple of the FRB.

Introduction to FRB

- A-few-msec coherent radio emission with $S_\nu \sim \text{Jy}$ @ 0.8-8 GHz
- Event rate : $\sim > 1000 \text{ day}^{-1}$
- Dispersion Measure ($\text{DM} = \int n_e ds$ in pc cm^{-3}) far exceeds Galactic value
 - **Extragalactic ($z = 0.1-2$)** if DM excess is due to IGM (loka03; Inoue04)
- Energy = $10^{38}-10^{42}$ erg
- Majority of FRBs (100/110) has not yet been seen to repeat

"Lorimer Burst" (FRB 010724)



Parkes 64m (Australia)



Arecibo 300m (Puerto Rico)



FAST 500m (China)



Effelsberg 100m (Germany)



GBT 90m (US)



LOFAR (Germany)



Murchison (Australia)



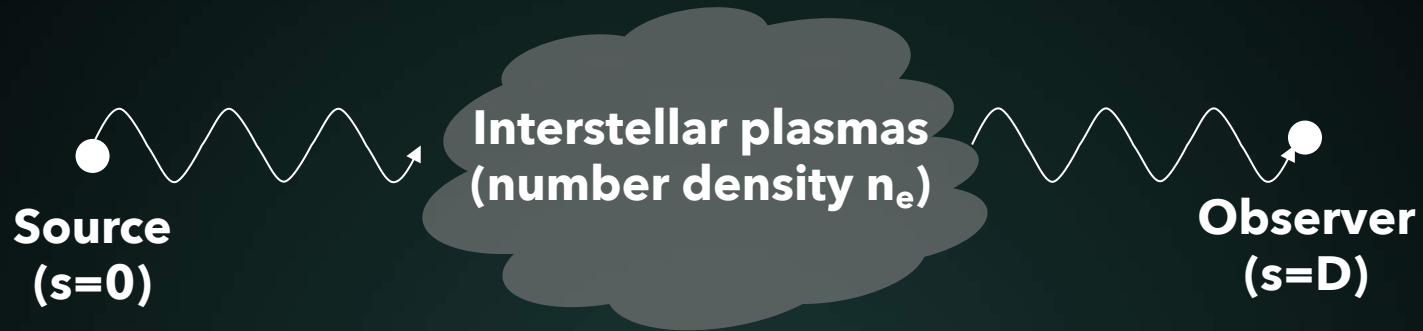
CHIME (Canada)



ASKAP (Australia)



MeerKAT (S. Africa)



- Dispersion relation: $\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$ where $\omega_p = \left(\frac{4\pi n_e e^2}{m_e} \right)^{1/2}$

- Group velocity: $v_{\text{group}} = \frac{d\omega}{dk} = c \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{1/2}$

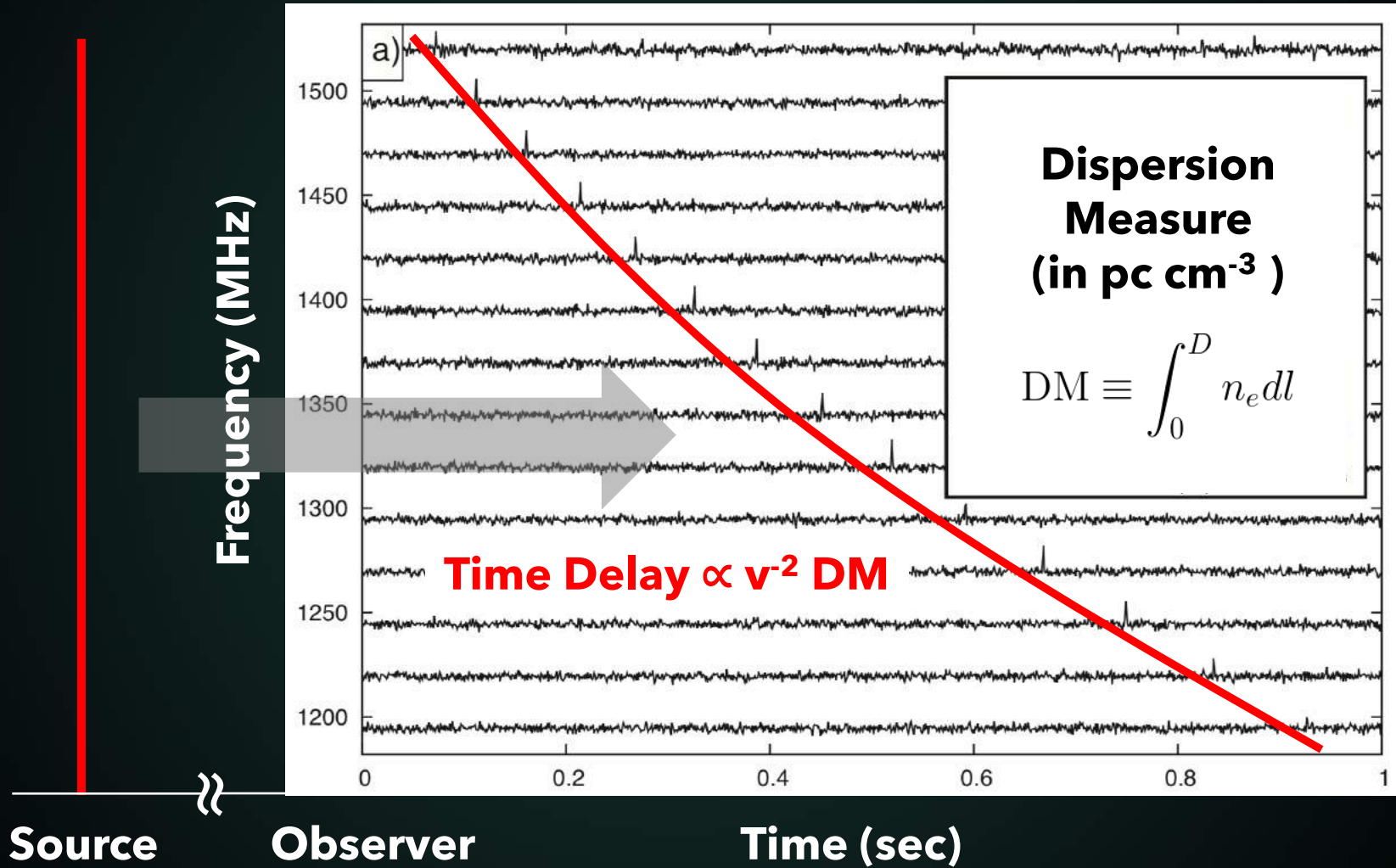
- Arrival time: $t_{\text{arrival}} = \int_0^D \frac{ds}{v_{\text{group}}} \approx \frac{D}{c} + \frac{e^2}{4\pi m_e c \nu^2} \text{DM}$

- Dispersion measure: $\text{DM} \equiv \int_0^D n_e ds$

見かけの到来時間差 $\propto \nu^{-2} \text{DM}$

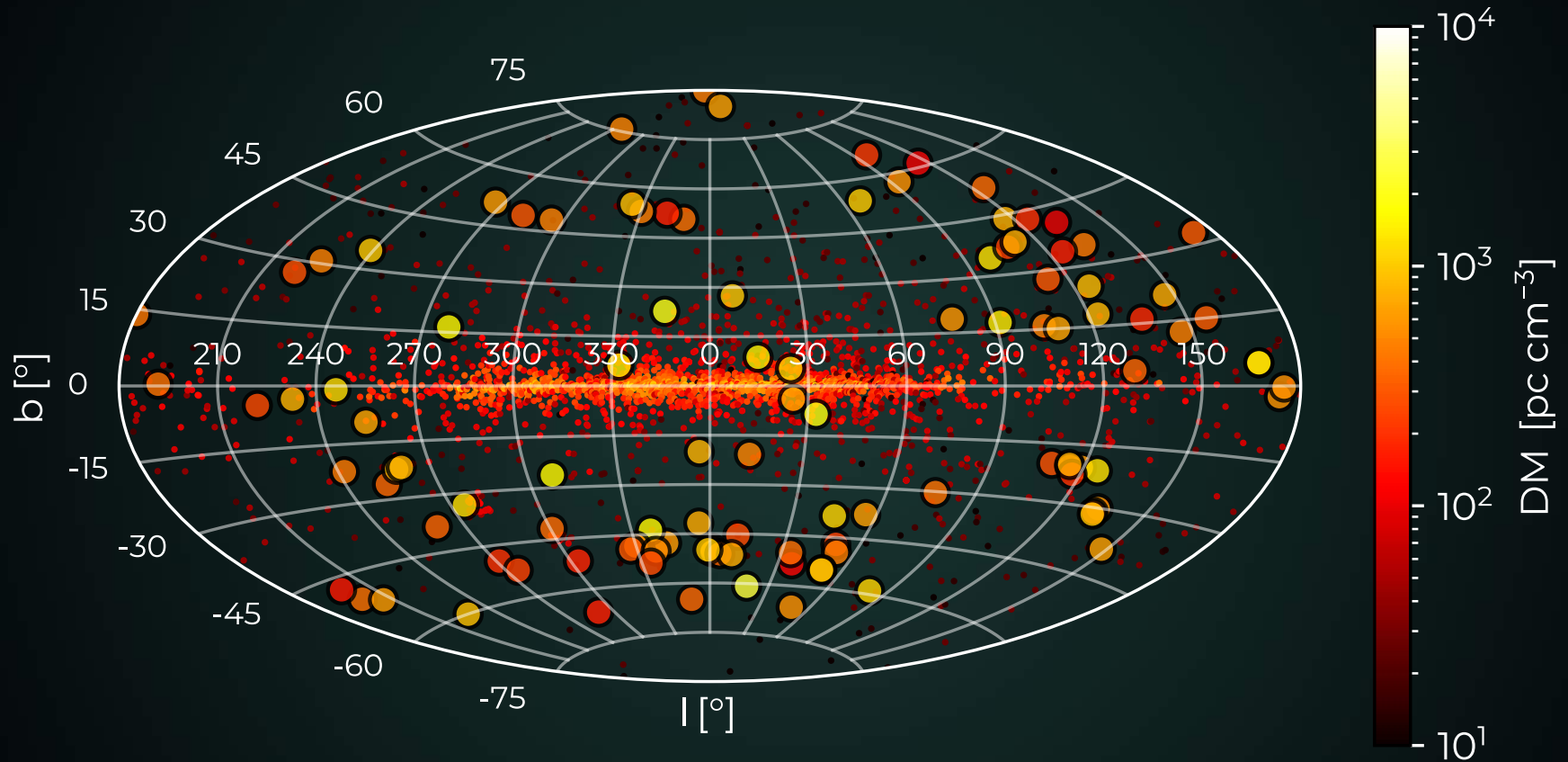
観測量

FRB 150418



DM DISTRIBUTION: PULSAR VS. FRB

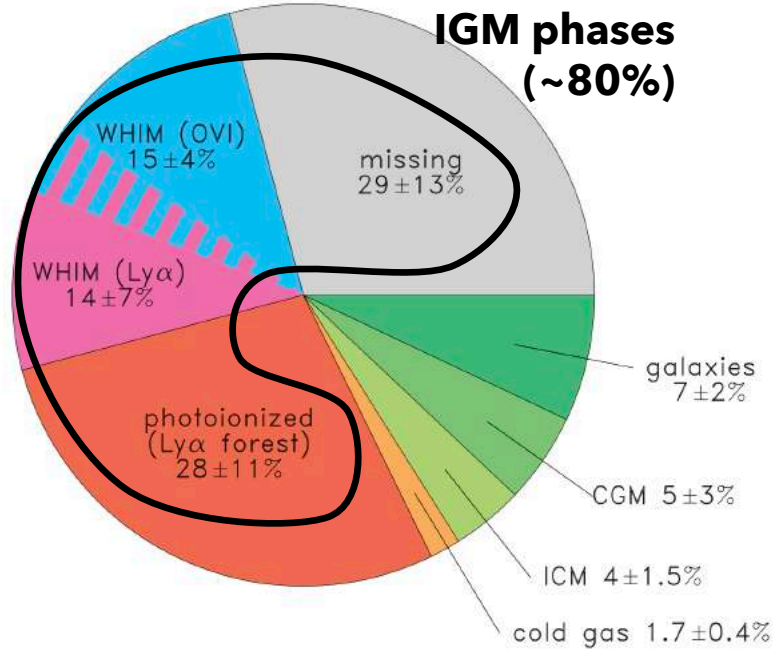
• Galactic pulsars ● FRBs



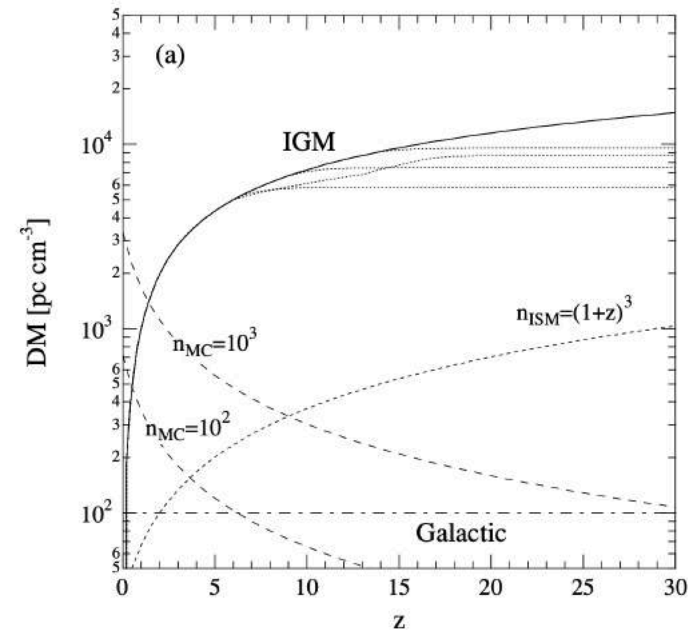
**Isotropic distribution & DM excess from pulsars
→ cosmological distances?**

FRBS AS COSMOLOGICAL PROBES?

Shull +11



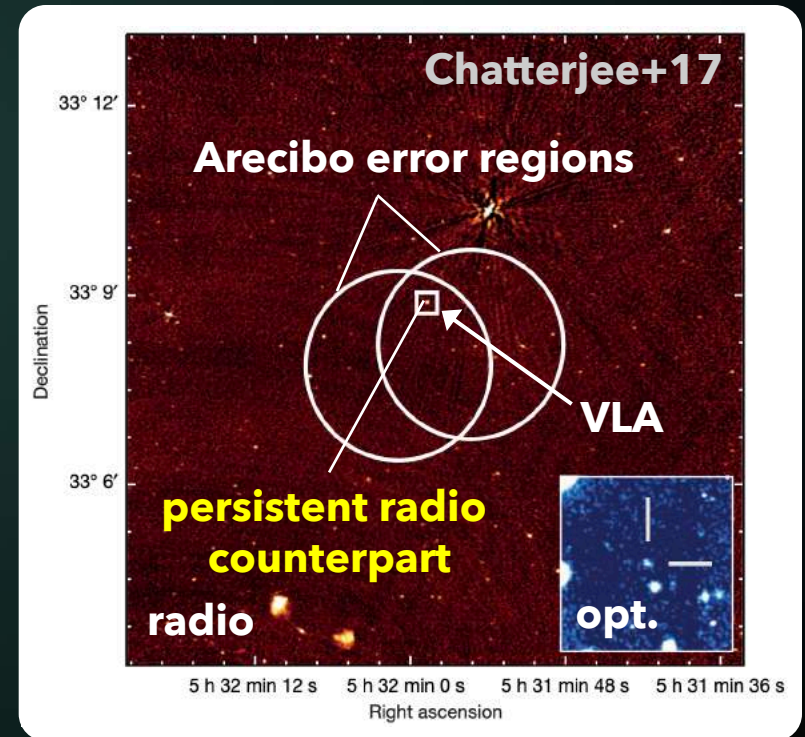
Inoue 04 (see also Ioka 03)



- 宇宙に存在するバリオンの30%は観測的に見つかっていない (cosmological missing baryon problem) → 銀河間空間物質 (IGM)?
- FRB の DM excess は銀河間空間物質 (IGM) の量に制限を与える
- 母銀河同定された (= 正確な距離測定) 遠方のFRBサンプルを用いれば **FRBの起源に関係なく宇宙論への適用が可能**

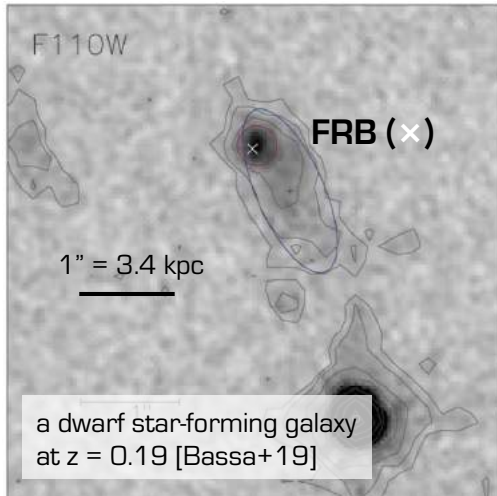
REPEATING SOURCE FRB 121102

- **First source confirmed to repeat multiple times**
(Spitler+14,16; Scholz+16)
- **Very Large Array (VLA) detected repeating FRBs** (Chatterjee+17)
- **0.1'' localization to a dwarf, star-forming host galaxy at $z=0.19$**
(Tendulkar+17; Marcote+17)
 - **$SFR \sim 0.4 M_{\text{Sun}}/\text{yr}$, $M_{\text{star}} \sim 10^7 M_{\text{Sun}}$**
- **Compact, bright, persistent radio counterpart ($\sim 10^{39}$ erg/s)**
- **The progenitor is most likely a young neutron star?**
(Kashiyama&Murase17; Metzger+17)

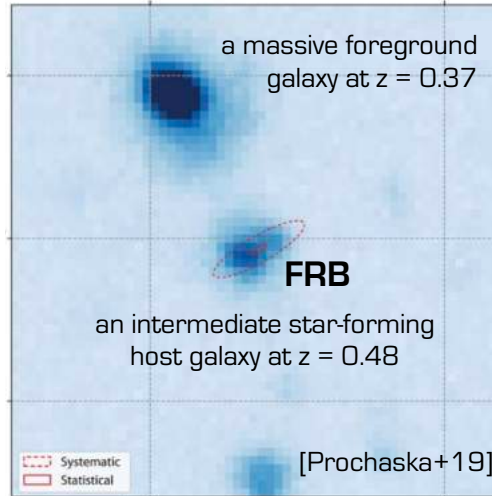


MORE HOST GALAXIES...

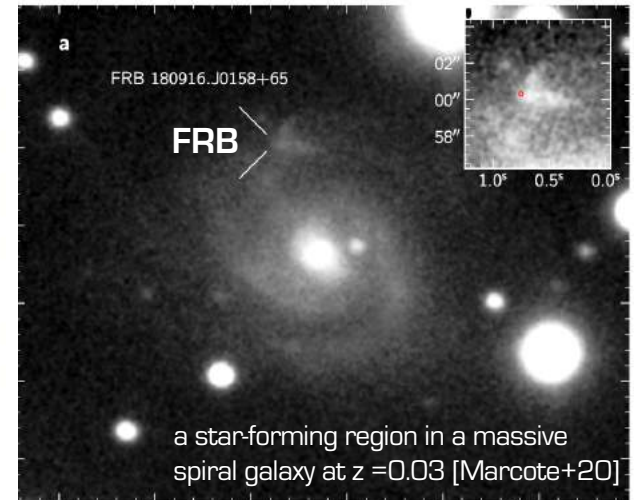
FRB 121102 (repeater)



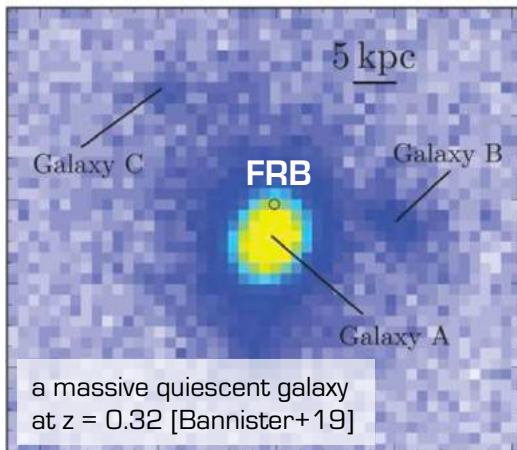
FRB 181112 (non-repeater)



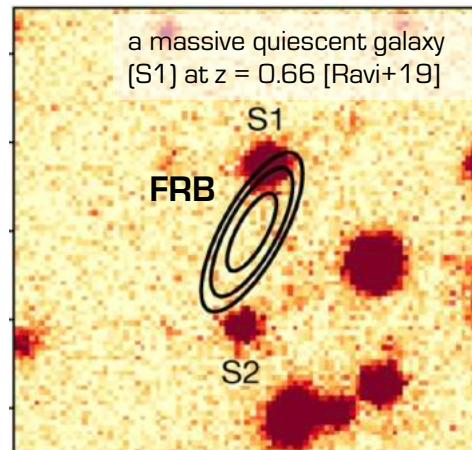
FRB 180916.J0158+65 [repeater]



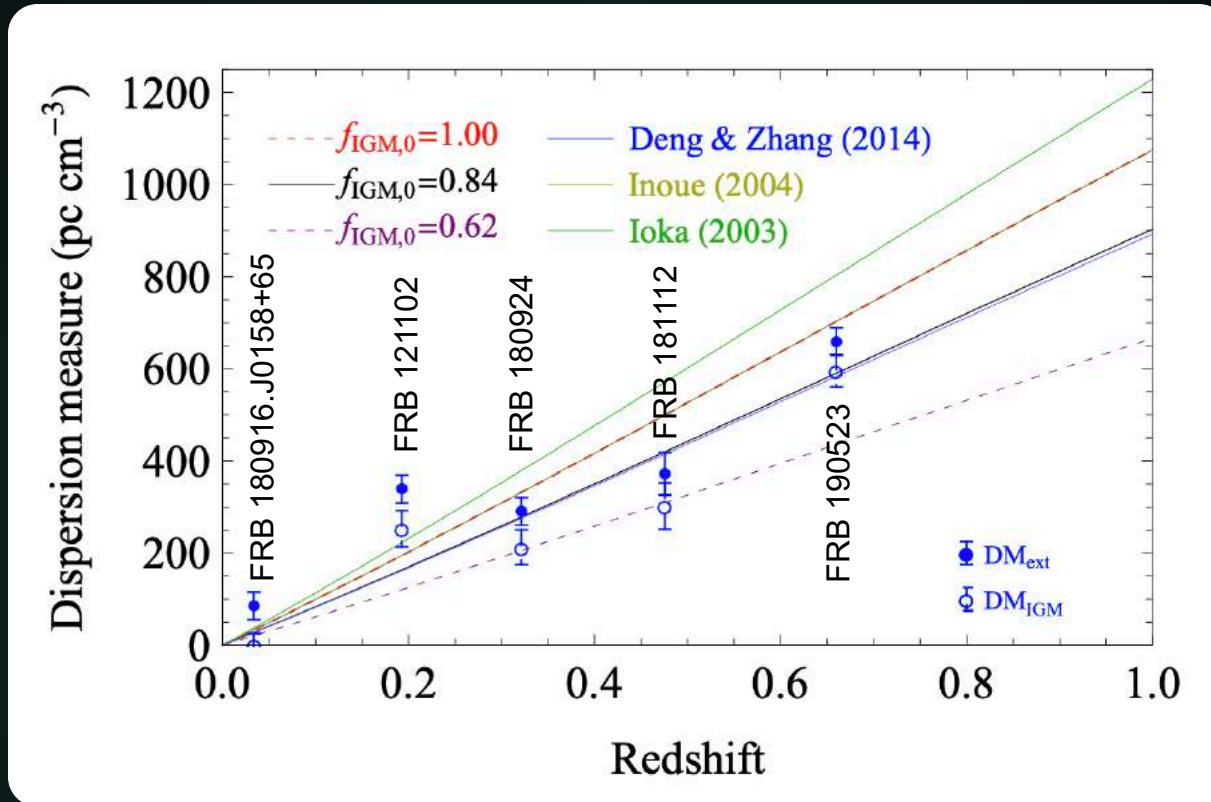
FRB 190523 (non-repeater)



FRB 180924 (non-repeater)



- 高角度分解能の電波望遠鏡の台頭やリピートする性質により母銀河が決まり始めた
- z = 0.03-0.66 の多様な性質を持つ母銀河 (宇宙論的遠方と確立)



- 母銀河同定された5個の FRB サンプルを用いて $DM_{IGM}-z$ 関係の検証
→ baryon fraction in IGM ~ 0.8 (e.g. Fukugita+98)と無矛盾
- 銀河内 DM モデルの不定性は、将来的に遠方(DM大)のFRBサンプルを増やすことで解決できる可能性がある

PROGENITOR MODELS

- **Collapse of supra-massive neutron stars** (Falcke & Rezzolla14)
- **Binary white dwarfs mergers** (Kashiyama+13)
- **Binary neutron star mergers** (Totani13; Wang+16; Yamasaki+18)
- **Superconducting cosmic strings** (e.g. Vachaspati08)
- **Evaporating primordial black holes** (Rees77)/**Quark nova** (Shand+15)
- **Black hole battery** (Mingarelli+15; Zhang+16)
- **Dark matter-induced collapse of neutron stars** (Fuller & Ott+15)
- **Magnetar flares** (e.g. Lyubarsky14; Connor+15; Belobolodov17,19; Metzger+19)
 - **Young pulsar wind nebula from SNe** (Murase+16; Kashiyama & Murase17; Metzger+17, Margalit+19a)
 - **Young pulsar wind nebula from BNS mergers** (Yamasaki+18; Margalit+19b)
- **Interacting NS binary** (Lyutikov+20; Ioka & Zhang 20)
- **Magnetar precession** (Levin+20)
- **Supergiant pulses from NSs** (e.g. Cordes & Wasserman16; Lyutikov16; Kisaka+17)
- **Pulsar in asteroid belt** (Dai+16)
- **Mass transfer in a WD-NS system** (Gu+16)
- **Pulsar in plasma stream** (Zhang17, 18)...

NS を含むモデルが多く提唱。マグネター説を推す向きが多い。

1. Repeating and Non-repeating FRBs from BNS Mergers

SY, Totani, Kiuchi 2018

- **Non-repeating FRBs**

連星中性子星合体の星周環境が、リピートしないFRBの発生条件を満たすことをシミュレーションによって明らかにした

- **Repeating FRBs**

連星中性子星合体後に残る、非常に若い(~10年)中性子星の活動がリピートするFRBを作るという説を初めて提唱した

- **Detection rate for two populations**

連星合体を起源とする2種族モデルに基づき、最も暗いFRBがリピーターとして最初に発見された理由を考察

1. Repeating and Non-repeating FRBs from BNS Mergers

SY, Totani, Kiuchi 2018

- **Non-repeating FRBs**

連星中性子星合体の星周環境が、リピートしないFRBの発生条件を満たすことをシミュレーションによって明らかにした

- **Repeating FRBs**

連星中性子星合体後に残る、非常に若い(~10年)中性子星の活動がリピートするFRBを作るという説を初めて提唱した

- **Detection rate for two populations**

連星合体を起源とする2種族モデルに基づき、最も暗いFRBがリピーターとして最初に発見された理由を考察

- FRBレート vs. 連星中性子星合体レート
 - FRB rate $O(10^3)/\text{day}$ at $z < 1-2 \rightarrow R_{\text{FRB}} \sim O(10^3-10^4) / f_b / \text{Gpc}^3/\text{yr}$
 - GW 170817 以前のレート $R_{\text{NS-NS}} \ll O(10^4) / \text{Gpc}^3/\text{yr}$ と無矛盾
 - 現在は $R_{\text{NS-NS}} = 1540^{+3200}_{-1220} / \text{Gpc}^3/\text{yr}$ (LVC 17)
- 以下の条件を満たす NS 双極放射で FRB の明るさを説明できる
 - 磁場強度 $B \sim 10^{12}$ G (マグネターでなくて良い)+ 回転周期 $P \sim 1$ ms
 - 電波パルサー程度のエネルギー変換効率 ($\epsilon_{\text{radio}} \sim 10^{-4}$)

双極放射 (= 回転エネルギー駆動)

$$\dot{E} = -6.2 \times 10^{45} \left(\frac{B}{10^{12.5} \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^6 \times \left(\frac{P}{0.5 \text{ ms}} \right)^{-4} \text{ erg s}^{-1}.$$

期待される FRB フラックス

$$F_\nu = \frac{1}{\nu_{\text{obs}}} \frac{\epsilon_r |\dot{E}|}{4\pi D_{\text{lum}}^2} = 0.02 \left(\frac{\epsilon_r}{10^{-4}} \right) \left(\frac{D_{\text{lum}}}{4.6 \text{ Gpc}} \right)^{-2} \times \left(\frac{B}{10^{12.5} \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^6 \left(\frac{P}{0.5 \text{ ms}} \right)^{-4} \text{ Jy}.$$

RADIO SIGNALS ABSORBED BY EJECTA?

- 連星中性子星合体はリピートしない FRB を説明するシナリオとして提案された
- 合体直前～合体時に電磁波放射を予測するモデルはあるが合体噴出物(ejecta)によって星周環境がすでに汚染されている可能性
- 電波放射は吸収されてしまい伝播不可能?
- 連星中性子星合体シミュレーションを用いて合体環境の透明性を調べた

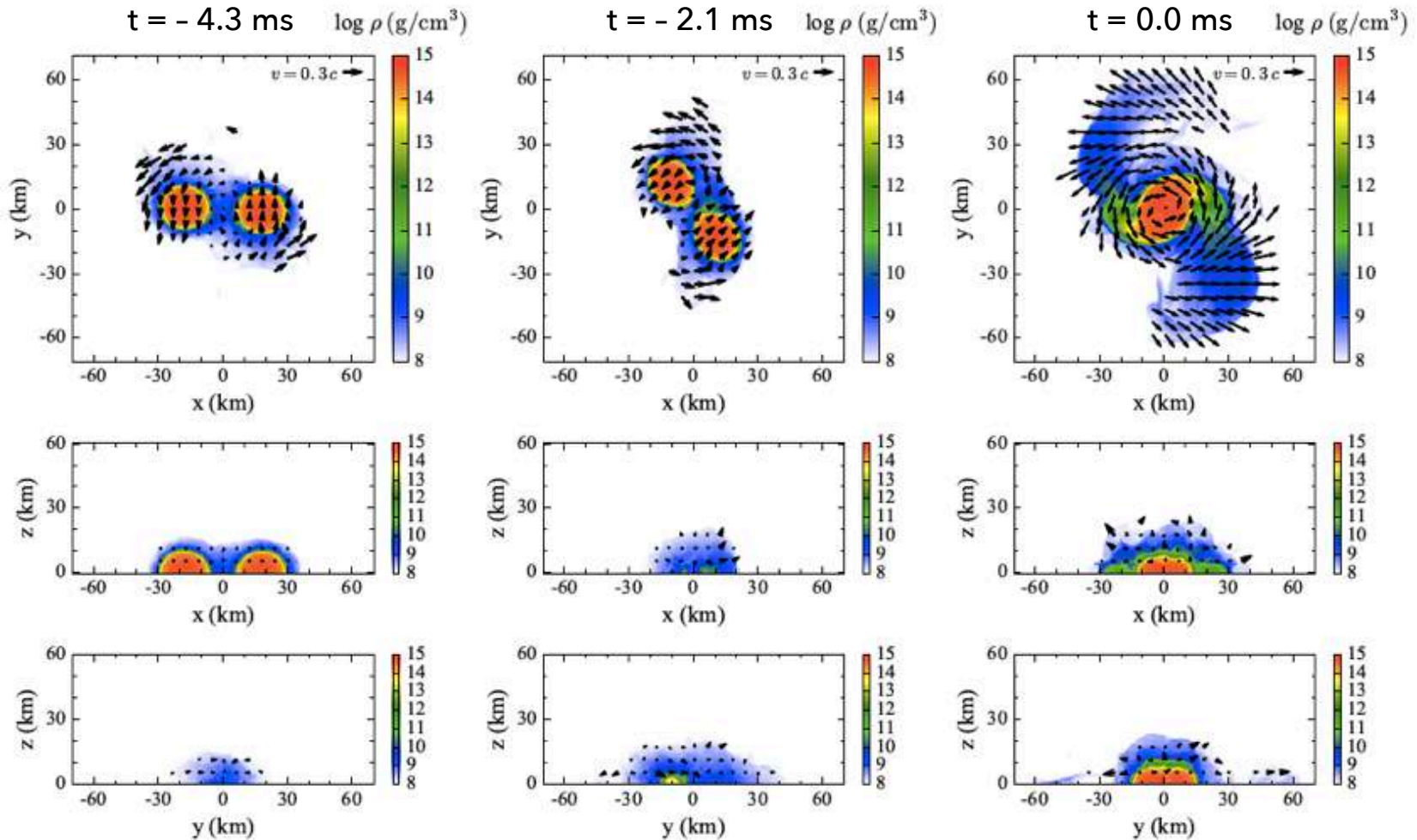


(Image Credit : NASA)

ショートガンマ線バースト/キロノヴァ/
重力波を伴う可能性

BNS MERGER SIMULATION

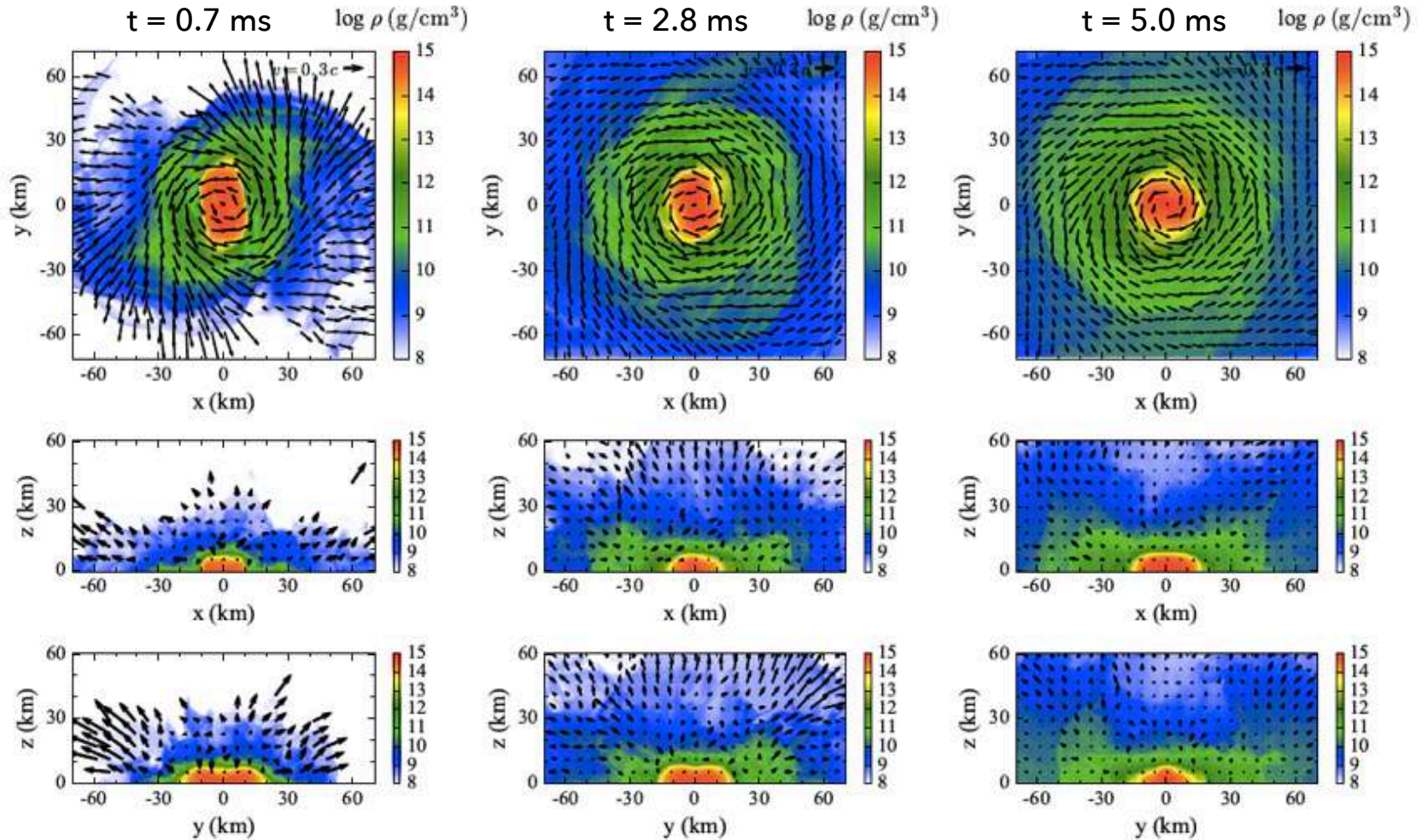
120 km



(1.35-1.35 M_{Sun} , H4 EOS, no B-field, simulated by K. Kiuchi)

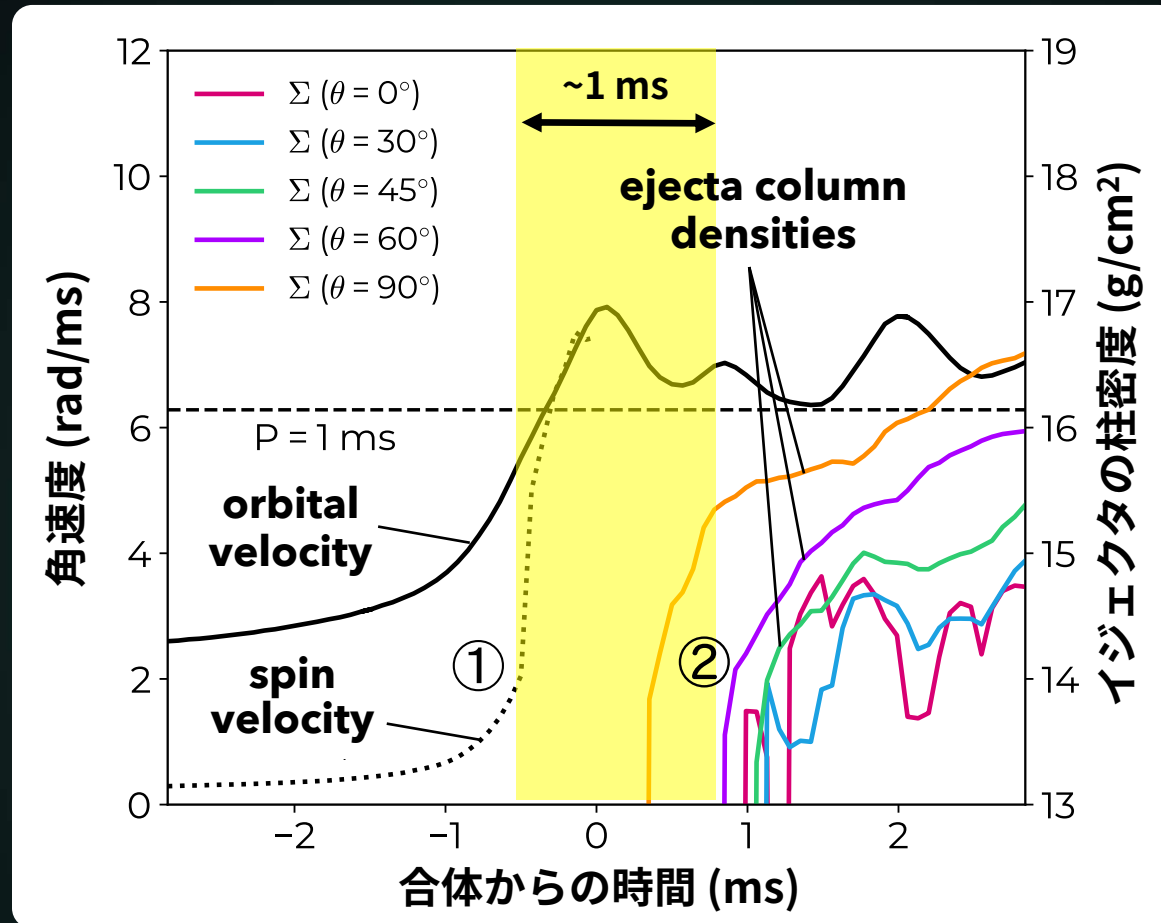
BNS MERGER SIMULATION

120 km



(1.35-1.35 M_{Sun} , H4 EOS, no B-field, simulated by K. Kiuchi)

WHICH IS EARLIER?: ROTATION VS EJECTA



- ① NS Spins up (FRB possibility increases) → ② Ejecta formation
- FRB signal can possibly escape during $(t - t_{\text{merge}}) = -0.5$ to 0.5 ms
- “Non-repeatingness” may be explained by the ejecta screening

1. Repeating and Non-repeating FRBs from BNS Mergers

SY, Totani, Kiuchi 2018

- Non-repeating FRBs

連星中性子星合体の星周環境が、リピートしないFRBの発生条件を満たすことをシミュレーションによって明らかにした

- Repeating FRBs

連星中性子星合体後に残る、非常に若い(~10年)中性子星の活動がリピートするFRBを作るという説を初めて提唱した

- Detection rate for two populations

連星合体を起源とする2種族モデルに基づき、最も暗いFRBがリピーターとして最初に発見された理由を考察

HOW TO EXPLAIN REPEATING FRBS?

- **A favored model: a young (30-100 yr) NS produced by SNe**
(Murase+16; Kashiyama & Murase 17; Metzger+17)
 - 特殊な超新星 Super-luminous SNe (SLSN) の後に残ると考えられる、ミリ秒で高速回転する強磁場中性子星の活動がリピーターFRBを生成
 - SLSN は リピーター FRB 121102 と同様の母銀河 (dwarf galaxy) で発生しやすい傾向
- **A fraction of BNS mergers may also produce a fast-rotating (~msec) long-lived NS**
 - この割合は中性子星の状態方程式と連星の質量分布に大きく依存
- $R_{\text{NS-NS}} (1500/\text{Gpc}^3/\text{yr}) \gg R_{\text{SLSN}} (40/\text{Gpc}^3/\text{yr})$ (※いずれも不定性大)
- これらの背景に基づき、連星合体後に形成される大質量中性子星の活動がリピーターFRBとして見えるというシナリオを新しく提案

DOUBLE POPULATION MODEL BY BNS MERGERS

BNS merger
($t = 0$)



**bright
non-repeating
FRB**

remnant NS
($t < \sim 1 \text{ yr}$)



**Dense ejecta
prohibit any radio
emission to escape**

pulsar wind nebula
($t = 1-10 \text{ yr}$)



**radio
counterpart**

**opt. thin to
free-free abs.**

**faint
repeating
FRBs**

- 連星合体の場合 ($B = 10^{12.5} \text{ G}$, $P = 1 \text{ ms}$, $M_{\text{ejecta}} = 0.01 M_{\text{Sun}}$, $v_{\text{ejecta}} = 0.1 c$), リピーターFRBは合体から **$O(10)$ 年後** に見えるようになる
- SN シナリオの場合 [**爆発から $O(100)$ 年後**] に比べ早い

1. Repeating and Non-repeating FRBs from BNS Mergers

SY, Totani, Kiuchi 2018

- Non-repeating FRBs

連星中性子星合体の星周環境が、リピートしないFRBの発生条件を満たすことをシミュレーションによって明らかにした

- Repeating FRBs

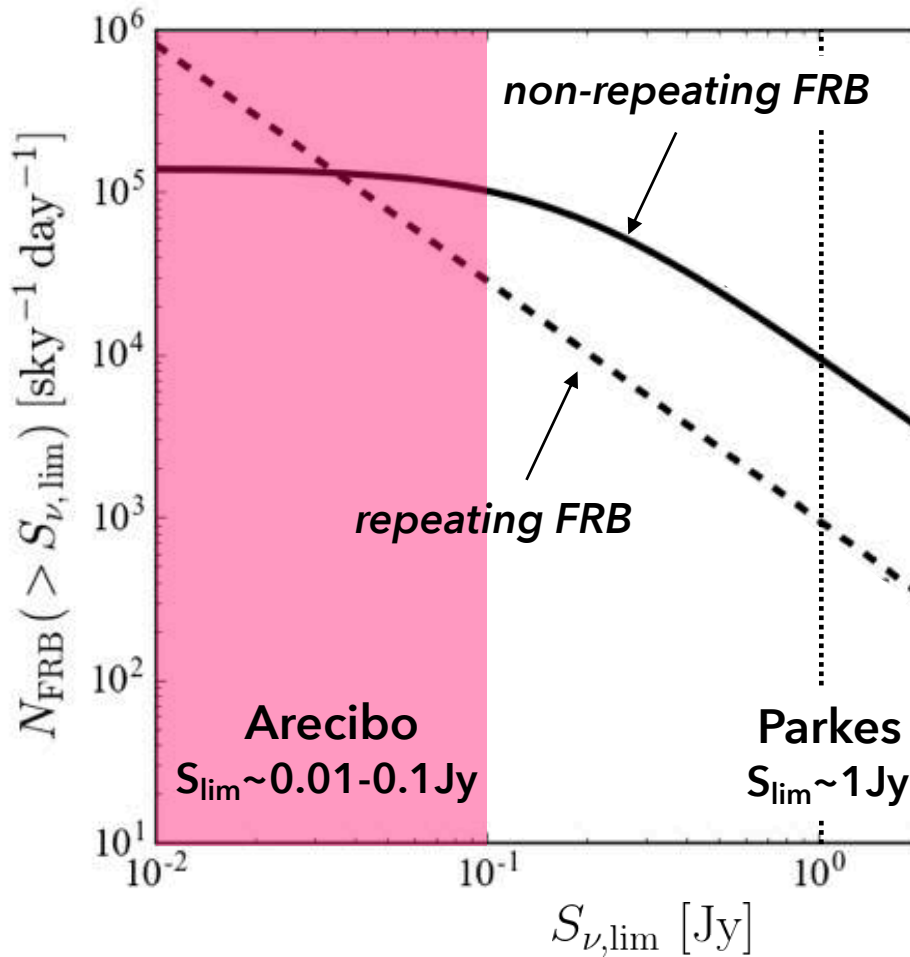
連星中性子星合体後に残る、非常に若い(~10年)中性子星の活動がリピートするFRBを作るという説を初めて提唱した

- Detection rate for two populations

連星合体を起源とする2種族モデルに基づき、最も暗いFRBがリピーターとして最初に発見された理由を考察

- 連星合体起源の非リピーター・リピーターの検出頻度の違いを定性的に調べたい
- 2種族を標準光源と仮定する
 - **bright, non-repeating FRBs** (1.0 Jy@z=1, e.g. Parkes FRBs)
 - **faint, repeating FRBs** (0.1Jy@z=0.2, e.g. FRB 121102)
- 典型的な連星中性子星合体頻度の z 進化を仮定
- 連星合体がある一定の割合でリピーターを生成する大質量中性子星を残すと考える

WHY WAS THE FAINTEST FRB FOUND AS REPEATER?



- Parkes 望遠鏡の感度でリピーター検出数が非リピーター検出数の~1割になると仮定
- repeating source の寿命を10年とすれば、~10%の連星合体が中性子星を後に残すことになる
- 検出感度を上げると、相対的にリピーターを見つける確率が劇的に向上する
- 高感度のAreciboサーベイで最初にリピーターが見つかった理由を上手く説明可能

CONCLUSIONS OF PART 1

- 連星中性子星合体におけるイジェクタの生成は、中性子星の回転が増大してから1ミリ秒ほど遅れることをシミュレーションを用いて明らかにした
 - **リピートしない FRB は合体環境を伝播可能**
- 連星中性子星合体後に残る、非常に若い中性子星の活動がリピートする FRB を作るという説を初めて提唱した
 - 合体後にリピーターFRB が見え始めるタイムスケールは $O(10 \text{ yr})$ (SN シナリオに比べ桁小さい)
 - **楕円銀河からのリピーターFRB を予言**
- 連星合体を起源とする2種族のFRBを考えることで、非常に暗いリピーターFRB 121102 が高感度の Arecibo サーベイで最初に発見された理由を説明

2. Submsec Rotations in FRBs as Evidence for BNS Mergers: Implications for NS EOSs

SY, Totani, Kiuchi (in prep.)

- **FRB 181112 from BNS merger?**

FRB 181112 の高時間分解能観測により、バーストが細かい4つのサブパルスで構成されると判明。サブパルス間の周期性 ~ 0.8 ms が中性子星由来ならば BNS merger で説明可能

- **Future implications for NS EOS**

将来的に FRB と GW を同時検出できれば、中性子星の状態方程式に重力波とは独立な制限を与えることを示す

2. Submsec Rotations in FRBs as Evidence for BNS Mergers: Implications for NS EOSs

SY, Totani, Kiuchi (in prep.)

- **FRB 181112 from BNS merger?**

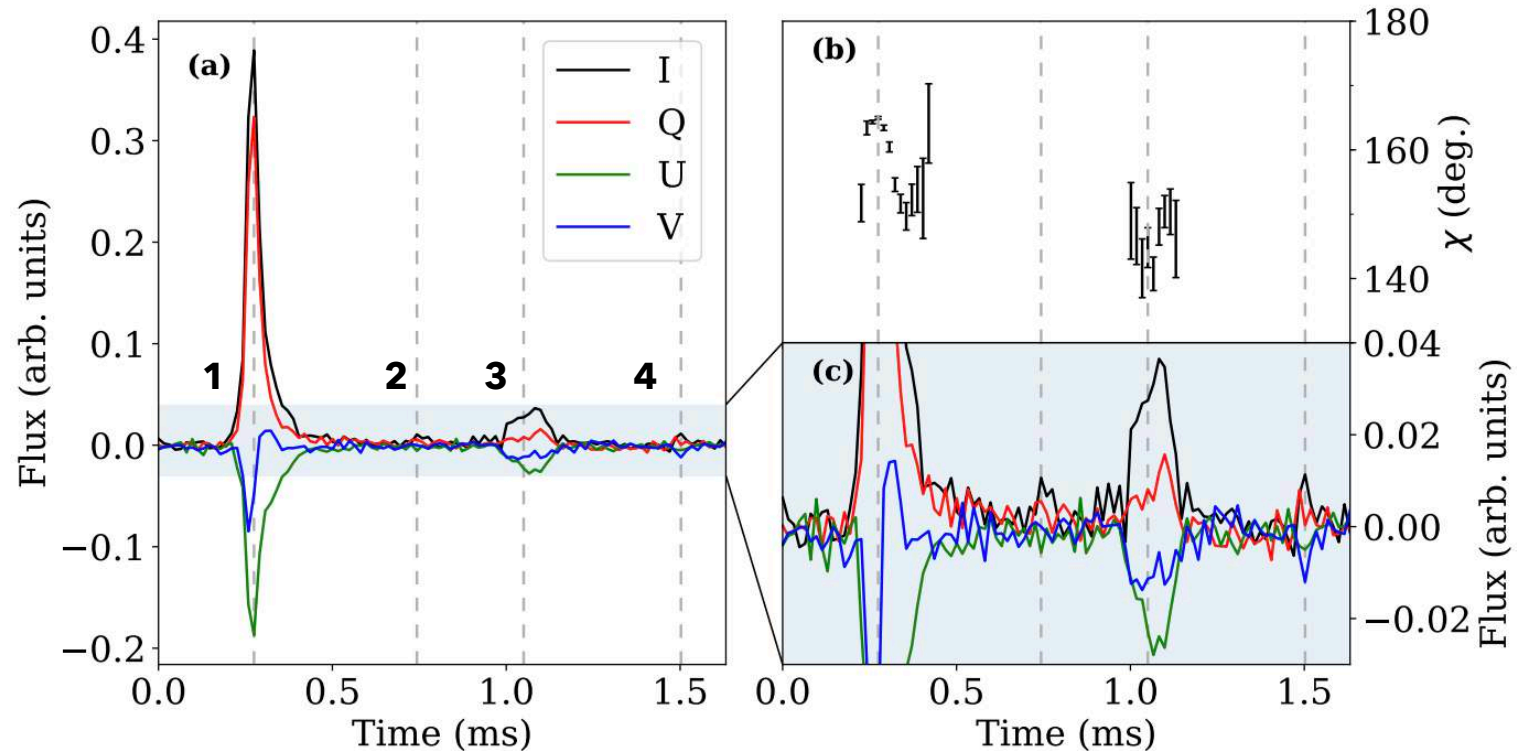
FRB 181112 の高時間分解能観測により、バーストが細かい4つのサブパルスで構成されると判明。サブパルス間の周期性 ~ 0.8 ms が中性子星由来ならば BNS merger で説明可能

- **Future implications for NS EOS**

将来的に FRB と GW を同時検出できれば、中性子星の状態方程式に重力波とは独立な制限を与えることを示す

Light curve

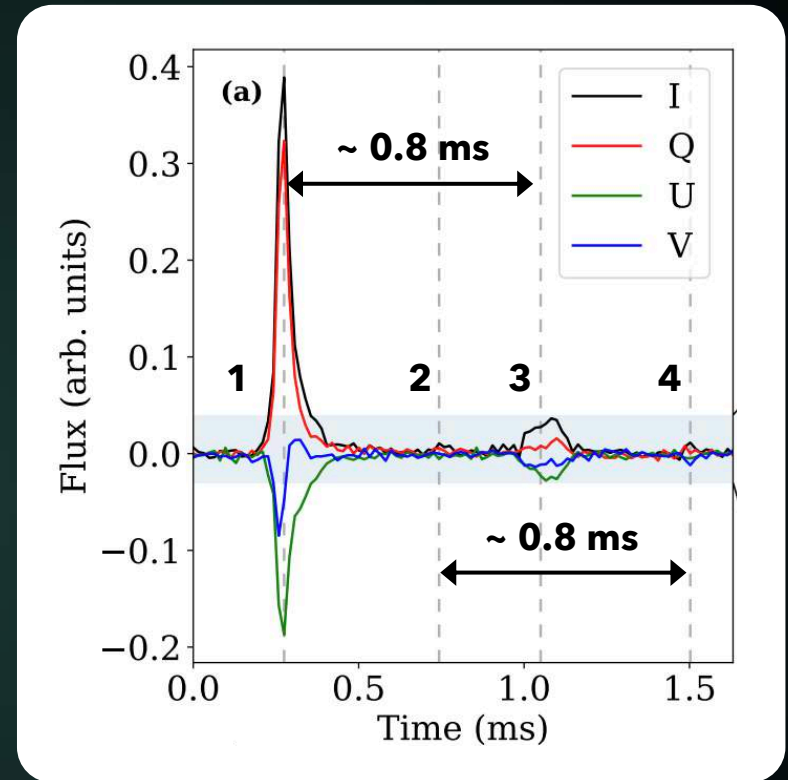
Polarization angle



リピートが確認されていない FRB 181112 (Prochaska+19) の高時間分解能解析により、バーストが4つの narrow pulse から成ることが判明した

PERIODICITY !?

- パルス到来時間の間隔 $t_{31} (= t_3 - t_1)$ と $t_{42} (= t_4 - t_2)$ はパルス幅(0.1 ms)の誤差内で $P \sim 0.8$ ms と一致 (Cho+20)
- $2P = 1.6$ ms 内で4つのパルスがランダムに発生する場合、こういうことが起きる確率は $O(10\%)$ と無視できない
- しかしパルス 1-3, 2-4 間の類似性(パルス強度, polarization, spectrum) は同じ放射領域(位相)を示唆 → 周期性は有意に思える



- **中性子星!??** 実際 $P = 0.8$ ms は EOS に依らず実現できる (Lattimer & Parkash 07)

$$P_{\min} \approx 0.81 \left(\frac{1.4 M_{\odot}}{M_{\text{TOV}}} \right)^{1/2} \left(\frac{R_{\text{TOV}}}{10 \text{ km}} \right)^{3/2} \text{ ms}$$

($M_{\text{TOV}} \cdot R_{\text{TOV}}$: 無回転中性子星の質量と半径)

THE ORIGINS OF MOST RAPIDLY SPINNING NEUTRON STAR

● Core-collapse supernovae (CCSNe)

- 理論: Progenitor のスピンの大きい場合は数ミリ秒になり得るが、シミュレーションの不定性大 (e.g. Heger+00; Thompson+05; Ott+06)
- 観測: 推定されるパルサーの初期スピンは $O(10-100 \text{ ms})$ 程度にピーク (Kaspi & Helfand 02; Faucher-Giguère & Kaspi 06)
- 回転最速のミリ秒パルサーは $P \sim 1.4 \text{ ms}$ (Hessels+08)

● Binary neutron star (BNS) merger

- 合体前の膨大な軌道角運動量 ($\sim 10^{53} \text{ erg}$) を受け継ぐため、massive remnant NS はサブミリ秒 (典型的に $0.5-1 \text{ ms}$) で高速差動回転 (e.g. Radice+18)
- CCSNe で $P \sim 0.8 \text{ ms}$ の中性子星を作ろうとすると **fine-tuning が必要**
- **BNS merger なら自然に説明できる。** 合体直後の ejecta に隠される前の放射が見えた (Yamasaki+18) と解釈可能

2. Submsec Rotations in FRBs as Evidence for BNS Mergers: Implications for NS EOSs

SY, Totani, Kiuchi (in prep.)

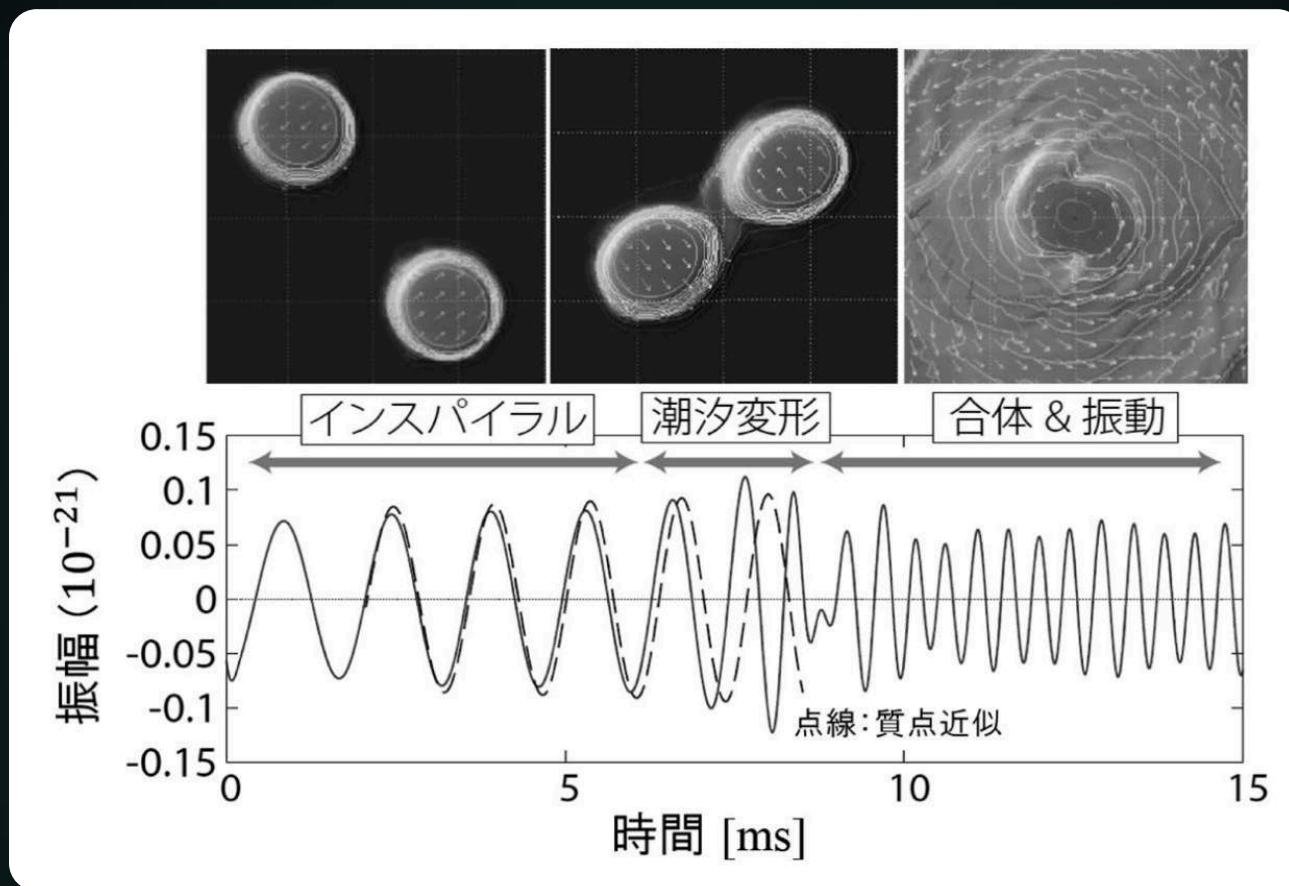
- FRB 181112 from BNS merger?

FRB 181112 の高時間分解能観測により、バーストが細かい4つのサブパルスで構成されると判明。サブパルス間の周期性 ~ 0.8 ms が中性子星由来ならば BNS merger で説明可能

- Future implications for NS EOS

将来的に FRB と GW を同時検出した場合、中性子星の状態方程式に重力波とは独立な制限を与えることを示す

GW 観測からわかること (e.g. 川口さんの研究紹介)

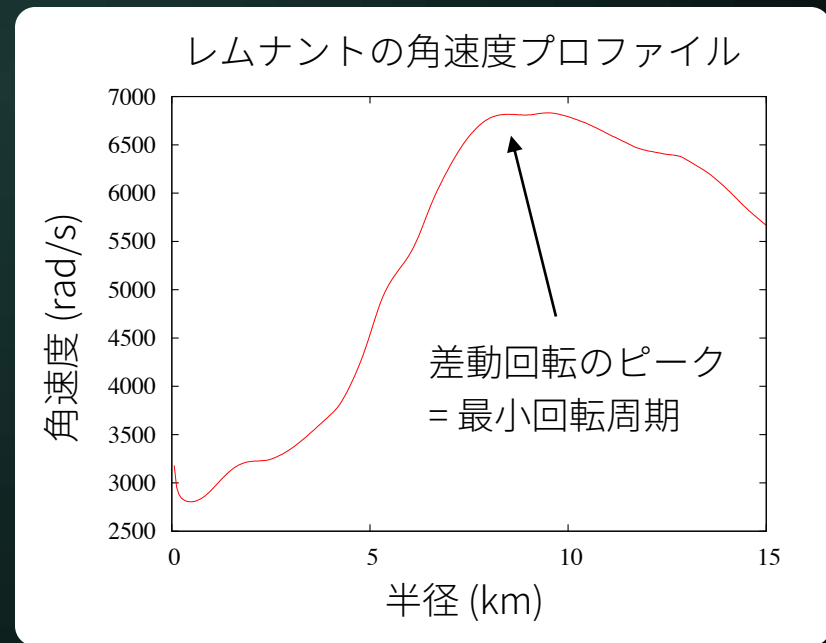


関口さん天文月報 111巻第2号より

- インスパイラル → 合体前星質量 ($M_{\text{tot}} \sim 2.74 M_{\text{sun}}$: GW170817)
- 潮汐変形期 → 潮汐変形率 ($100 \ll \Lambda < 800$: GW170817)
- 合体後 → 合体後星質量, スピン(現状感度では困難)

方法論

- FRB 181102 = BNS merger ならば、FRB 観測から合体後の重い中性子星(レムナント)の回転周期がわかる → 今後何をどう制限できるか?
- 連星中性子星合体シミュレーションから得られる情報と組み合わせる(総質量 $2.5-2.73 M_{\text{sun}}$ / 質量比 $0.7-1$ / EOS 5パターン; Kiuchi+19)
- Piecewise-polytropic EOS: 核物理から予言される高密度EOSを系統的に扱う現象論的モデル (e.g. Read+09)
- 合体後 10-15ms の角速度プロファイルのピークからレムナントの回転周期 P_{rem} を抽出



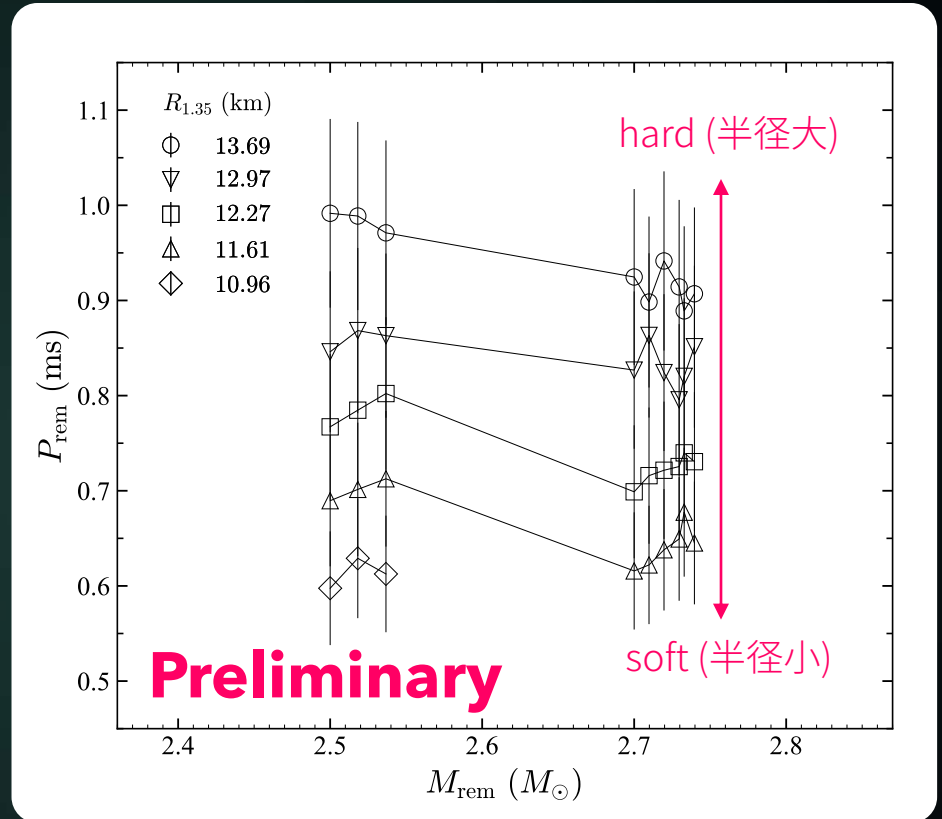
FRB と GW を組み合わせてわかること: 「周期-質量」

- 仮に合体後の回転則がケプラーだと思つと

$$P_{\text{rem}} \propto \sqrt{R_{\text{rem}}^3 / M_{\text{rem}}}$$

- P_{rem} は中性子星半径(EOS)に強く依存
- $P_{\text{rem}} (\sim f_{\text{peak}}^{-1})$ を GW から測定するのは現状では困難
- FRB 181112-like FRB が同時に受ければ、周期の情報は GW と相補的

レムナント回転周期



レムナント質量

※ M_{rem} は連星総質量で近似
(イジェクタ質量は無視)

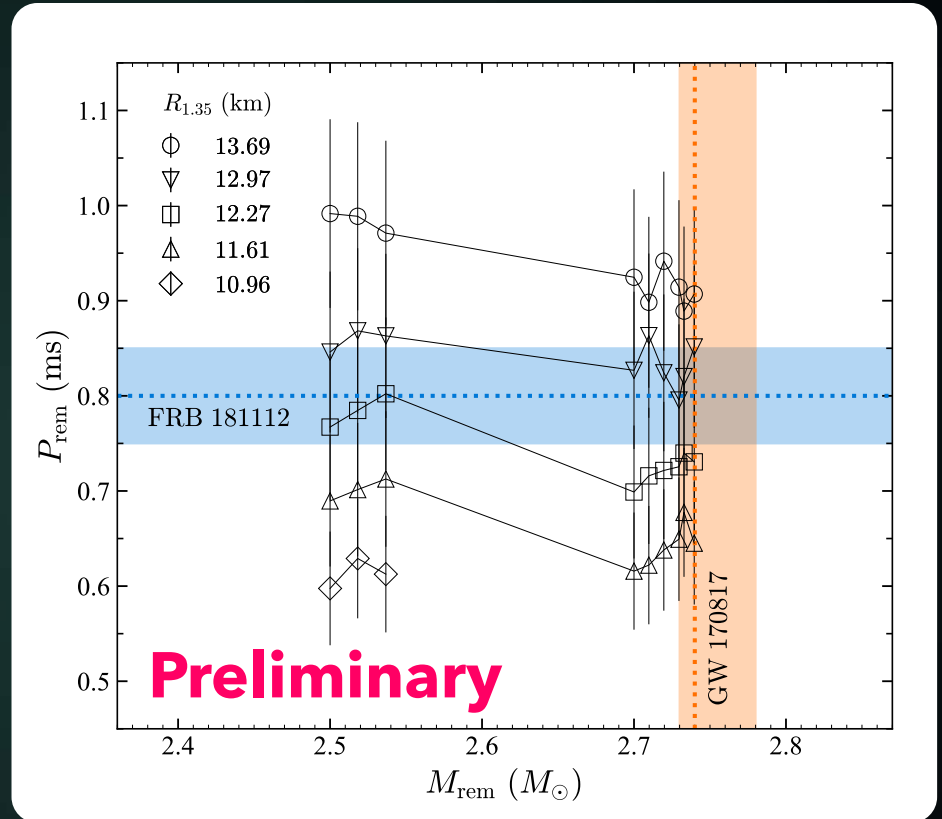
FRB と GW を組み合わせてわかること: 「周期-質量」

- 仮に合体後の回転則がケプラーだと思つと

$$P_{\text{rem}} \propto \sqrt{R_{\text{rem}}^3 / M_{\text{rem}}}$$

- P_{rem} は中性子星半径(EOS) に強く依存
- $P_{\text{rem}} (\sim f_{\text{peak}}^{-1})$ を GW から測定するのは現状では困難
- FRB 181112-like FRB が同時に受ければ、周期の情報は GW と相補的
- 周期 (FRB) + 質量 (GW) により EOS の硬さがある程度制限できる可能性

レムナント回転周期



レムナント質量

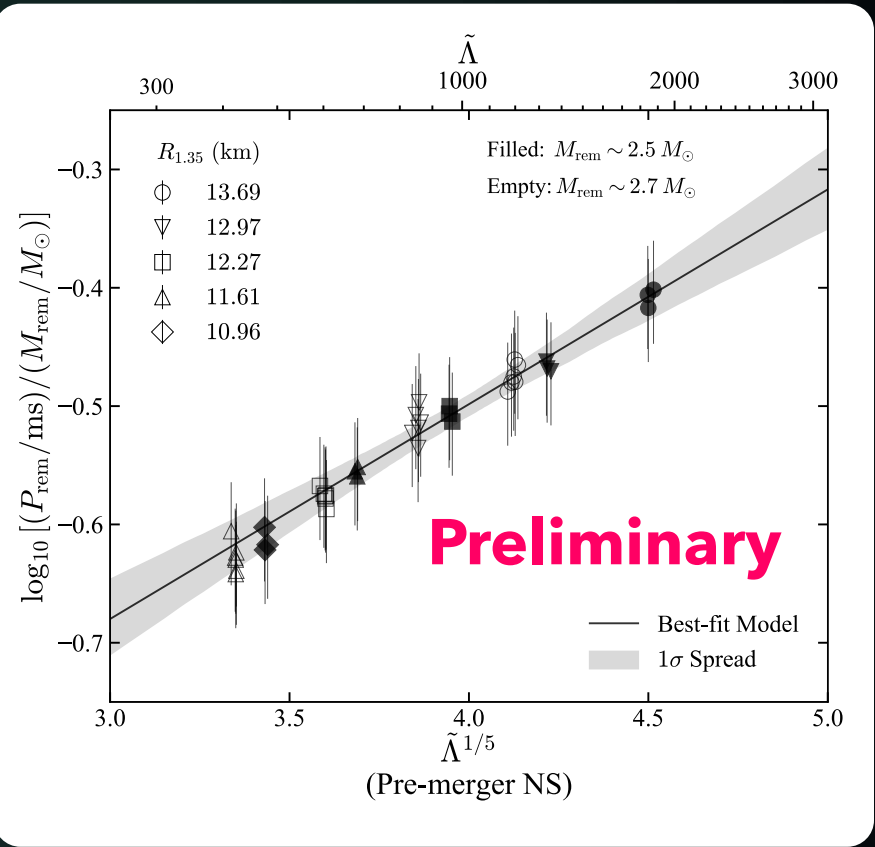
※ M_{rem} は連星総質量で近似
(イジェクタ質量は無視)

FRB と GW を組み合わせるとわかること: 「周期-潮汐変形率」

- $P_{\text{rem}}/M_{\text{rem}}$ (無次元周期) と潮汐変形率(Λ)はEOSに関係なくとても良い相関を示す
- 縦軸は合体後のレムナントの情報
 - ・ 横軸は合体前の個々のNSの情報を含む
- $C_{\text{合体前}}$ と $C_{\text{合体後}}$ の相関は非自明だが、シミュレーションから経験則が得られた

$$P_{\text{rem}}/M_{\text{rem}} \propto (R_{\text{rem}}/M_{\text{rem}})^{3/2} = C_{\text{合体後}}^{-3/2}$$

レムナント回転周期-潮汐変形率関係



$$\Lambda^{1/5} \propto R_{\text{TOV}}/M_{\text{TOV}} = C_{\text{合体前}}^{-1}$$

※ 中性子星のコンパクトネス $C = M/R$

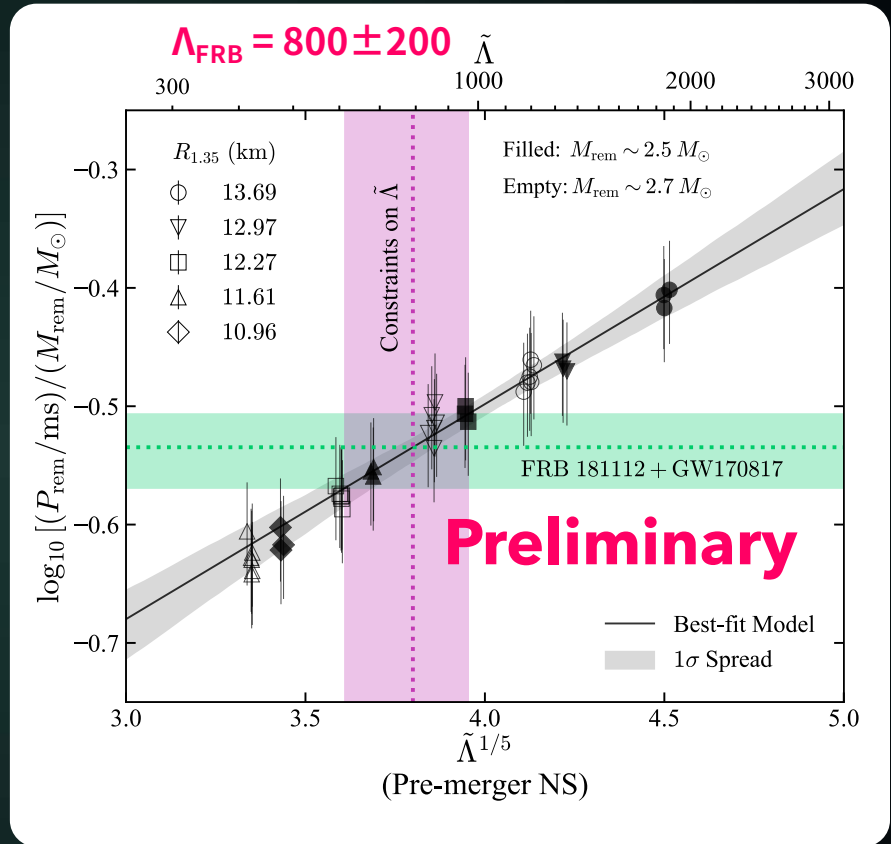
※ Λ はインスパイラルGWの観測から決まる

FRB と GW を組み合わせるとわかること：「周期-潮汐変形率」

- $P_{\text{rem}}/M_{\text{rem}}$ (無次元周期) と潮汐変形率(Λ)はEOSに関係なくとても良い相関を示す
- 縦軸は合体後のレムナントの情報
 - ・横軸は合体前の個々のNSの情報を含む
- $C_{\text{合体前}}$ と $C_{\text{合体後}}$ の相関は非自明だが、シミュレーションから経験則が得られた
- $C_{\text{合体後}}$ (FRB+GW) に経験則を適用して得た Λ_{FRB} は GW による Λ_{GW} とは独立な制限を与える
 $(\Lambda_{\text{FRB}} = 800 \pm 200 \leftrightarrow \Lambda_{\text{GW170817}} < 800)$

$$P_{\text{rem}}/M_{\text{rem}} \propto (R_{\text{rem}}/M_{\text{rem}})^{3/2} = C_{\text{合体後}}^{-3/2}$$

レムナント回転周期-潮汐変形率関係



$$\Lambda^{1/5} \propto R_{\text{TOV}}/M_{\text{TOV}} = C_{\text{合体前}}^{-1}$$

※ 中性子星のコンパクトネス $C = M/R$

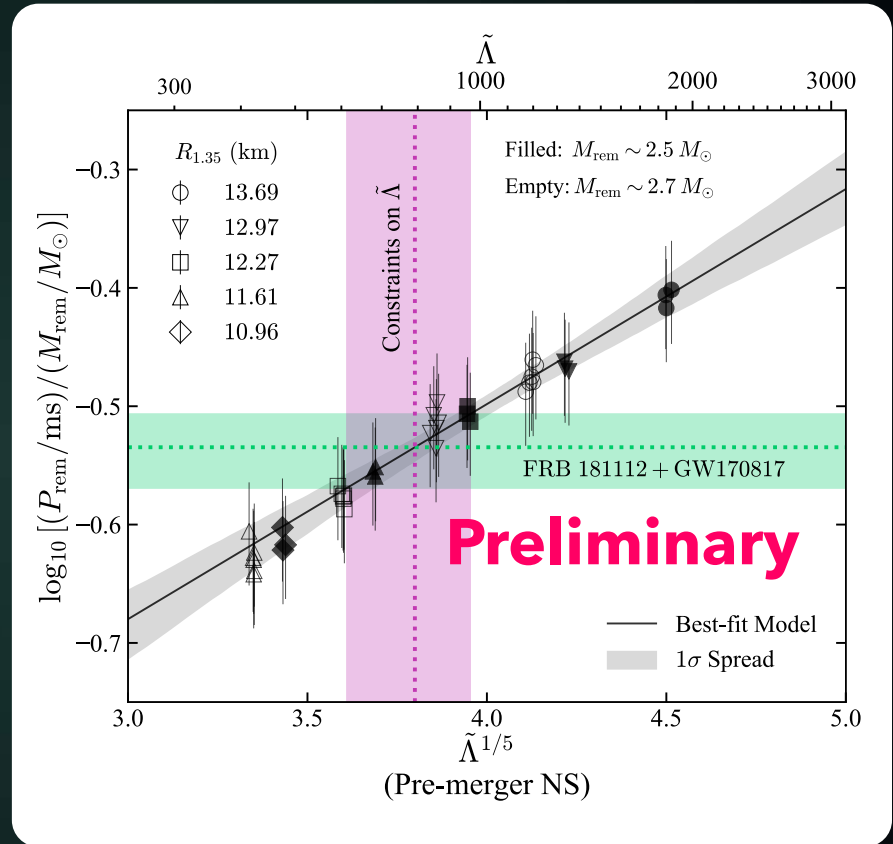
※ Λ はインスパイラルGWの観測から決まる

FRB と GW を組み合わせてわかること: 「周期-潮汐変形率」

- $P_{\text{rem}}/M_{\text{rem}}$ (無次元周期)と潮汐変形率(Λ)はEOSに関係なくとても良い相関を示す
- 縦軸は合体後のレムナントの情報
 - ・横軸は合体前の個々のNSの情報を含む
- $C_{\text{合体前}}$ と $C_{\text{合体後}}$ の相関は非自明だが、シミュレーションから経験則が得られた
- $C_{\text{合体後}}$ (FRB+GW) に経験則を適用して得た Λ_{FRB} は GW による Λ_{GW} とは独立な制限を与える
 $(\Lambda_{\text{FRB}} = 800 \pm 200 \leftrightarrow \Lambda_{\text{GW170817}} < 800)$
- $\Lambda_{\text{FRB}} \neq \Lambda_{\text{GW}}$ の場合、核密度が高い合体後に現れ得る「新しい相」の存在を探れる可能性がある

レムナント回転周期-潮汐変形率関係

$$P_{\text{rem}}/M_{\text{rem}} \propto (R_{\text{rem}}/M_{\text{rem}})^{3/2} = C_{\text{合体後}}^{-3/2}$$



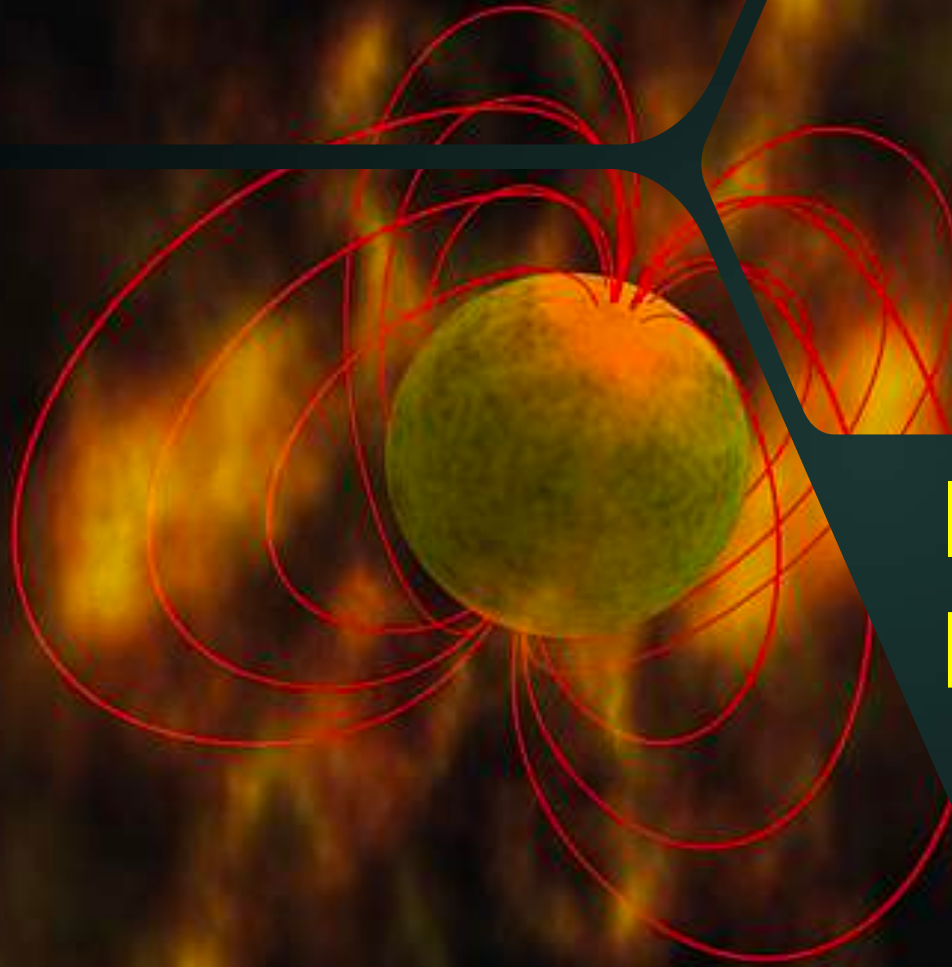
$$\Lambda^{1/5} \propto R_{\text{TOV}}/M_{\text{TOV}} = C_{\text{合体前}}^{-1}$$

※ 中性子星のコンパクトネス $C = M/R$

※ Λ はインスパイラルGWの観測から決まる

SUMMARY OF PREDICTIONS

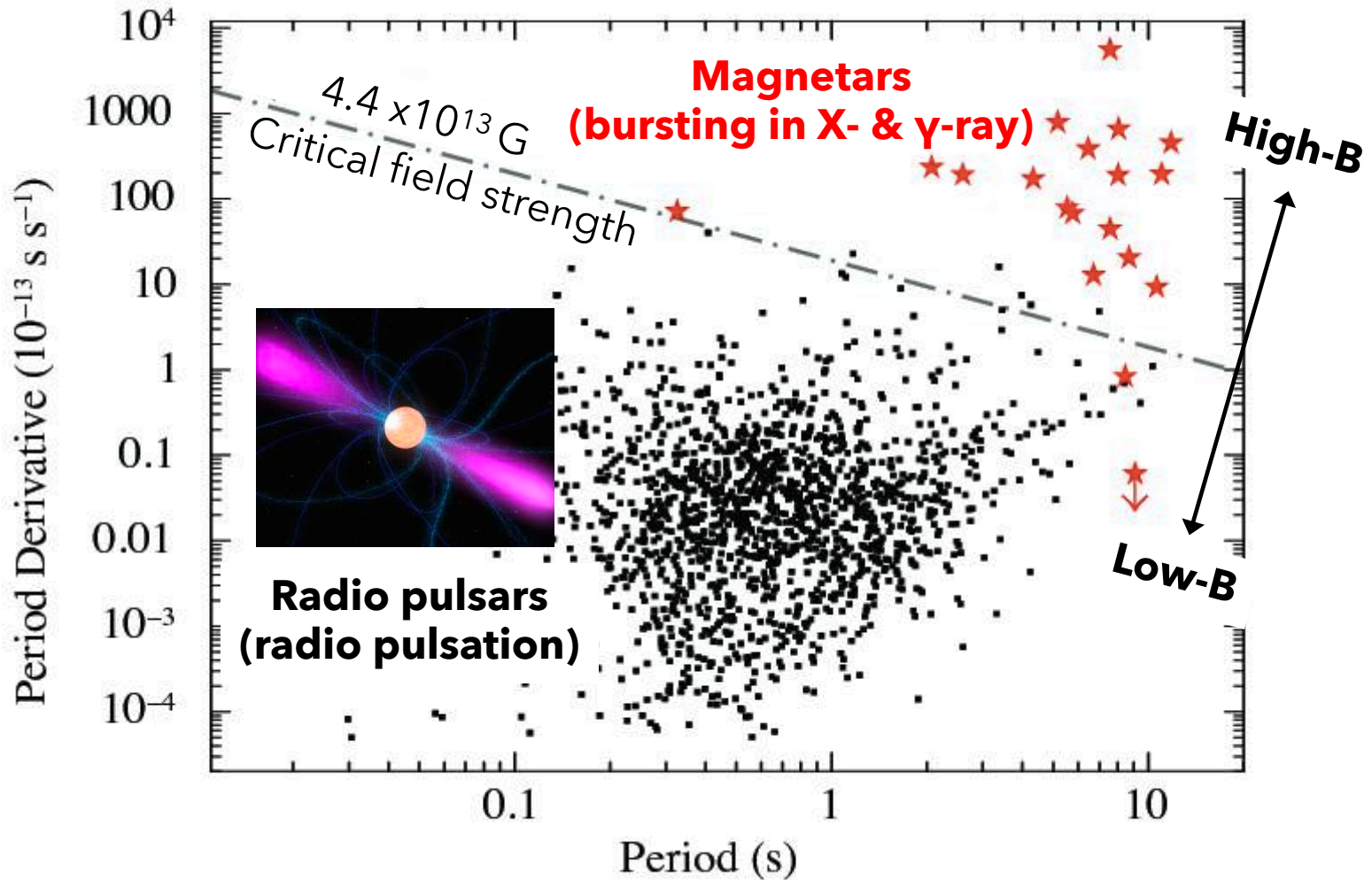
- 今回の解釈が正しければ、将来的にFRB 181102-like FRB が多く見つかるはず (少なくとも一部の FRB = BNS merger ということの強い間接証拠になる)
- 現状の GW 観測では合体直後の情報を得る事が難しいので、高時間分解された FRBパルスから回転周期を探る手法は相補的
- 将来的に FRB 181102-like FRB と GW が同時に受ければ
 - ・ 潮汐変形率(もしくは)半径に観測的に独立なエラーバー付きの制限がつく
 - ・ 合体前の GW の解析から示唆される潮汐変形率(半径)と今回提案している関係式から示唆される潮汐変形率が一致するかは非自明。同時にこの2つの制限をパスする核密度状態方程式はより厳しく制限される
 - ・ 究極的に、FRB 181102-like FRB と post-merger GW が同時に検出されれば FRB と GW からわかる周期同士を直接比較する事が可能
 - ・ DECIGO による合体予報を使って GW・電波を精度良く同時観測できる可能性



Introduction to Magnetar Flares

MAGNETAR = HIGHLY MAGNETISED NEUTRON STAR

Rea+13



$$B = 3.2 \times 10^{19} (PP)^{1/2} \text{ Gauss}$$

(assuming rotational energy loss = dipole radiation)

BURSTS/FLARES FROM MAGNETARS

Short bursts (most common)

- $t \sim 0.1 - 1 \text{ s}$
- $L \sim 10^{38} - 10^{40} \text{ erg/s}$
- thermal spectra ($< 10 \text{ keV}$)

※ 静穏時のマグネターの
X線光度は $\sim 10^{35} \text{ erg/s}$

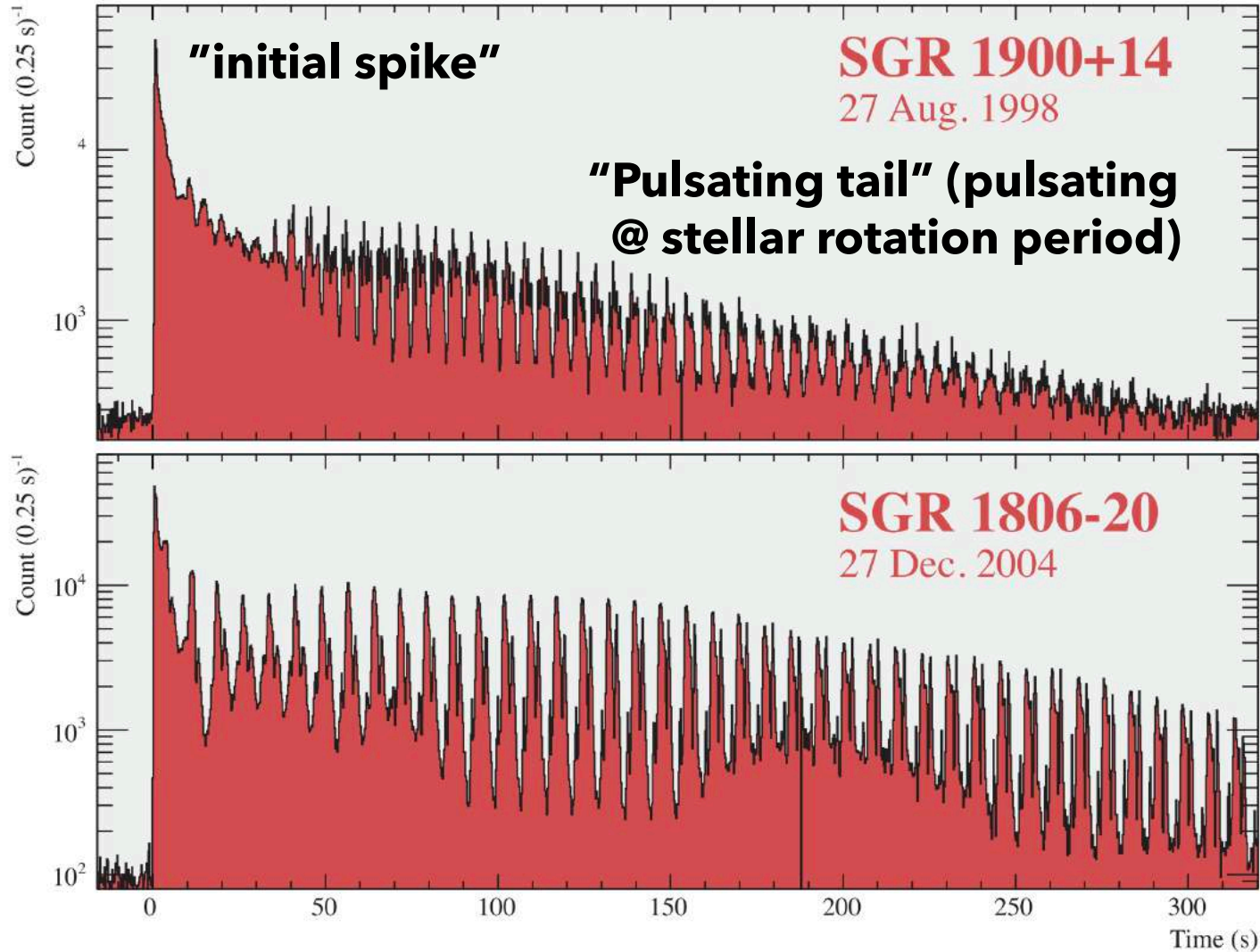
Giant flares (very rare)

- the brightest gamma-ray events ever (SGR 1806-20)
- $L \sim 10^{44} - 10^{47} \text{ erg/s}$
- initial spike ($\sim 0.1 \text{ s}$) + pulsating tail ($\sim \text{a few } 100 \text{ s}$)

フレアのエネルギーは8桁以上に渡って連続的に分布
(e.g. Cheng+96; Gogus+01; Nakagawa+07)

FRB と関連している可能性もある

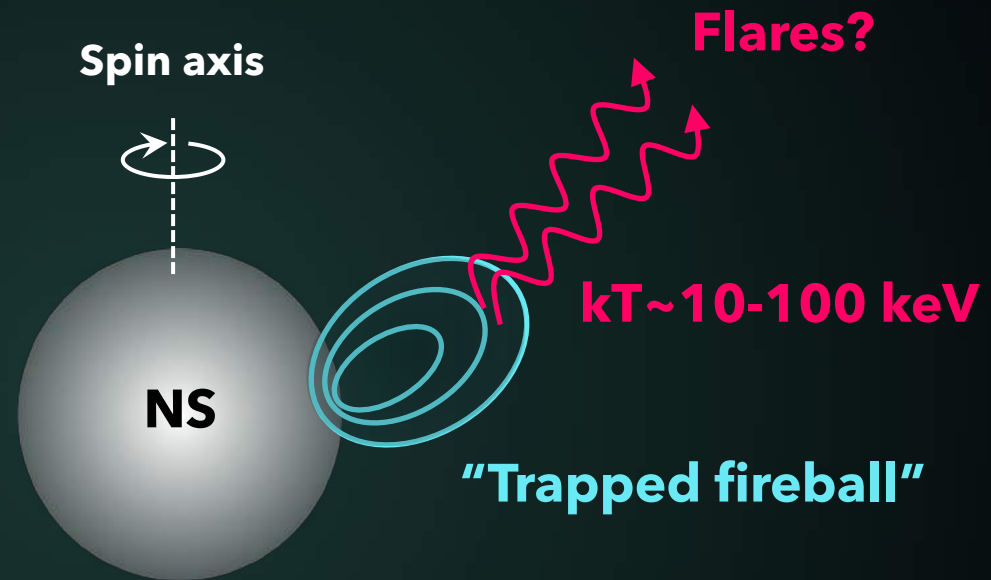
(e.g. Lyubarsky14; Belobolodov17; Metzger+19; Margalit+19)



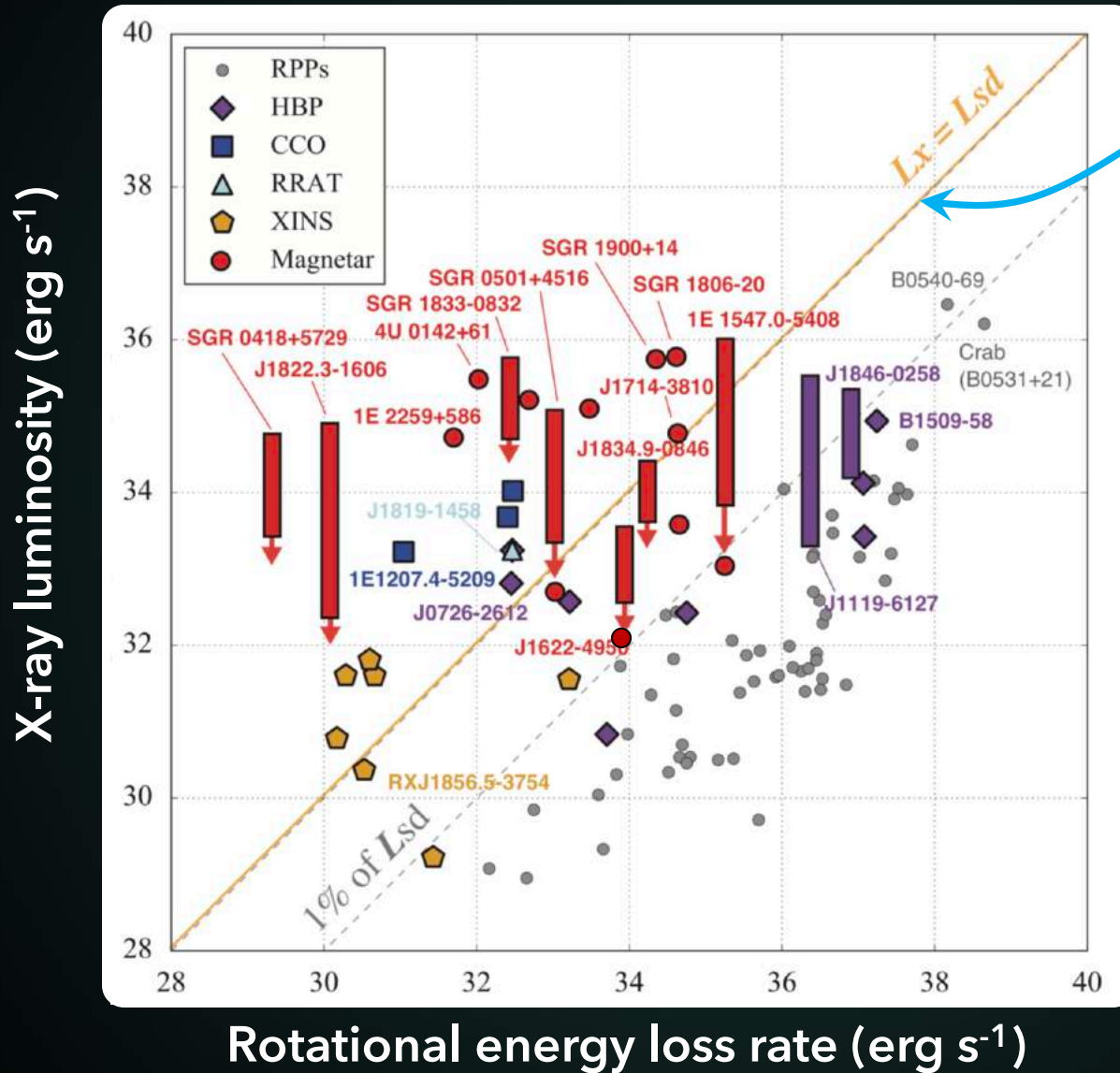
MODEL FOR FLARES

- 磁気エネルギー散逸により、 e^\pm と光子から成る optically-thick plasma (= fireball) が生成

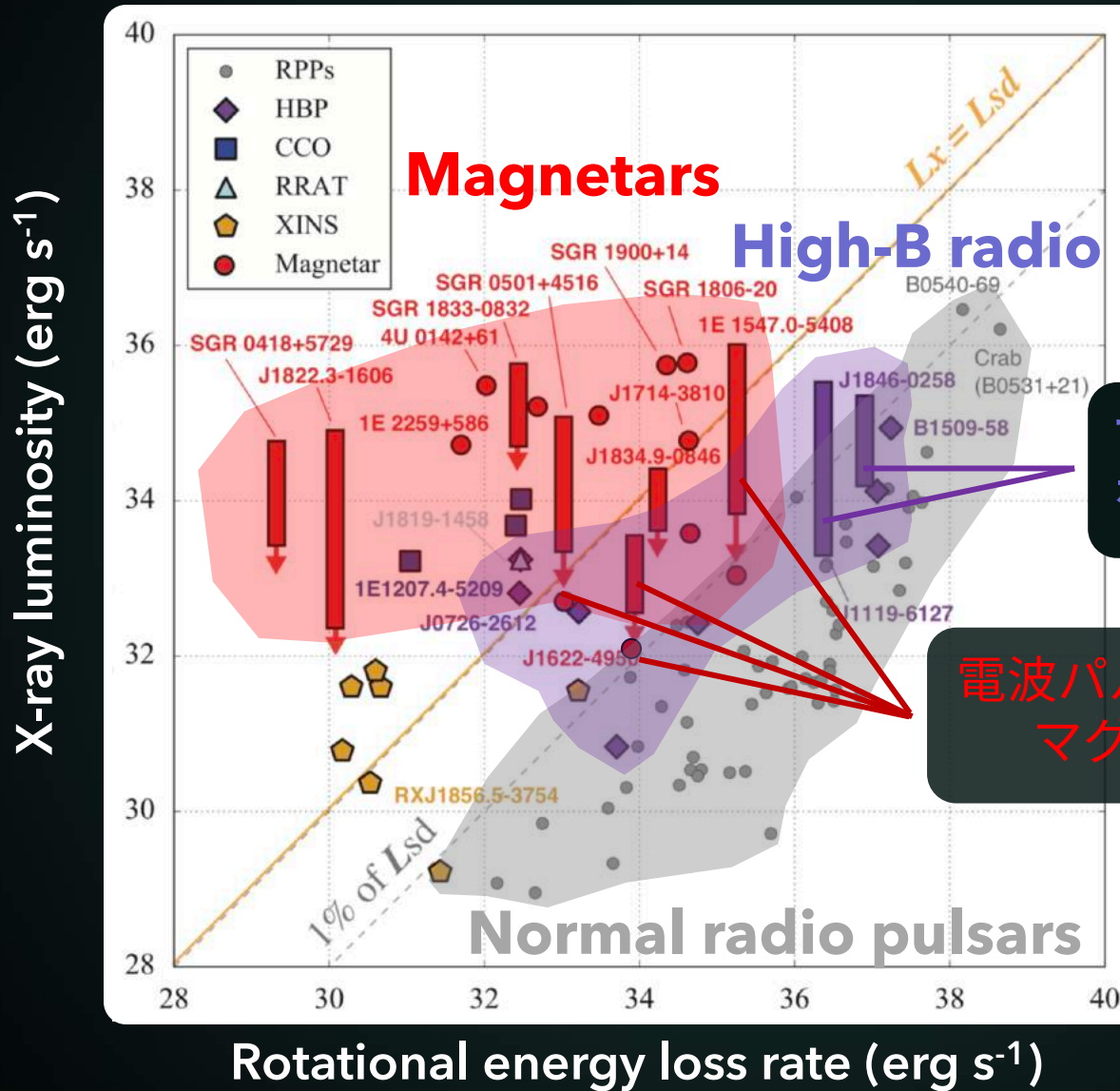
- マグネターの強い磁気圧により fireball は星表面に束縛され、光球面から熱的な X線 or ガンマ線放射 (= フレア) を行う (Thompson & Duncan 95)



- Short burst のようにエネルギーの小さいフレアの際に trapped fireball が生成可能かどうかは未解決問題 (Kaspi & Beloborodov 17)

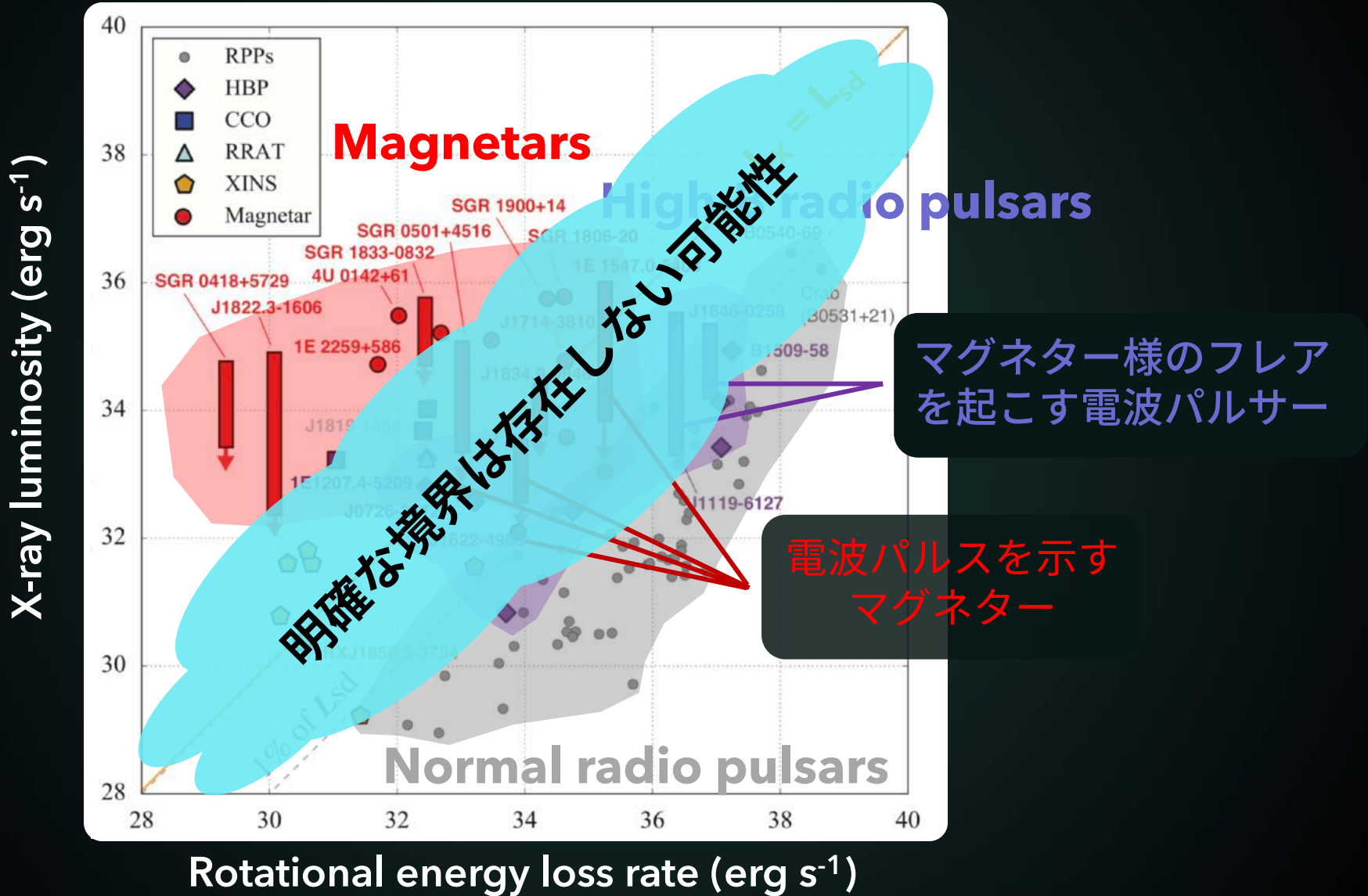


回転エネルギーだけで平穏時のX線光度を説明できる限界



マグネター様のフレアを起こす電波パルサー

電波パルスを示すマグネター



3. Missing Links btw. Magnetar Flares & Radio Emission

SY, Kisaka, Terasawa, Enoto 2019

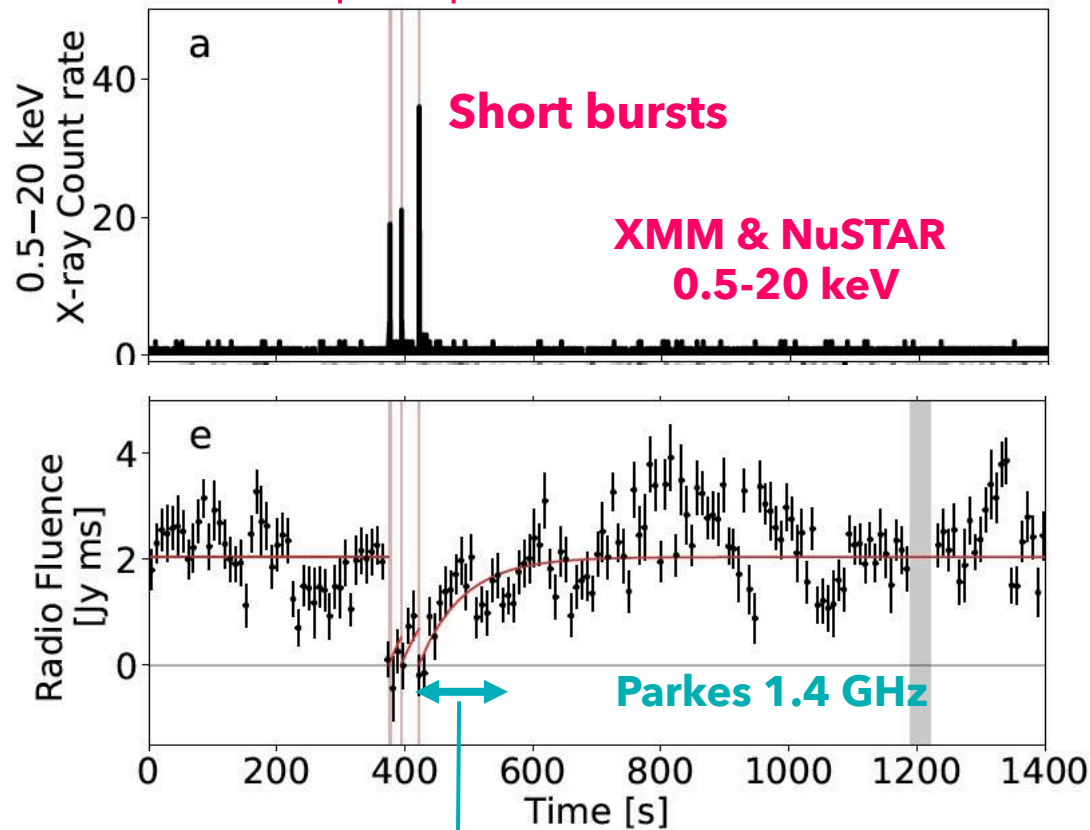
- Short burst の起源

fireball プラズマの一部が星表面を叩いてホットスポットを形成し、継続時間の短いフレアとして観測される可能性を新しく提案

- 電波パルス消失現象の起源

バースト時に光速で放出されるプラズマ流が電波放射を吸収することで、電波パルスが一定時間消失することを理論的に示した

- Durations ~ a few seconds for each
- $E_{\text{rad}} \sim 10^{37}$ erg with ~2 keV blackbody



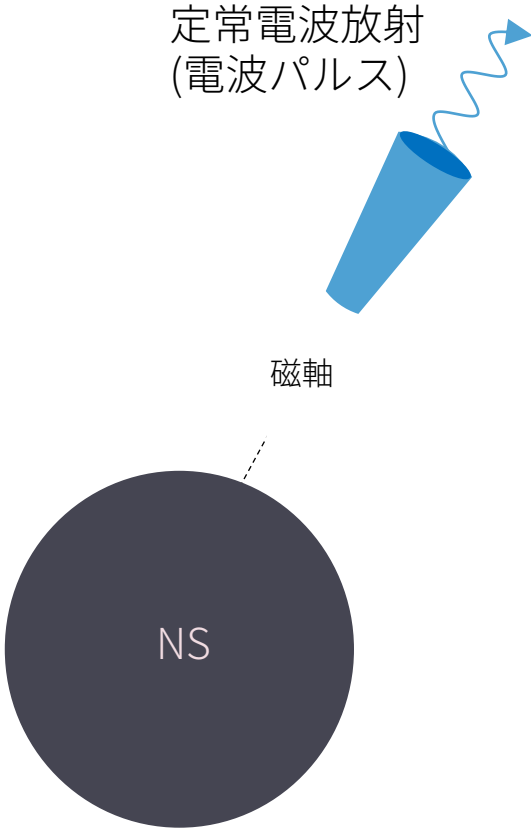
- 強磁場電波パルサー J1119-6127 がマグネターと同様のフレア(short burst)を起こした
- short burst に同期して、もともと見えていた電波パルスが ~100 秒間消失した
- 電波放射とフレアを繋ぐ物理は何か？

- Radio suppression timescale $\tau_{\text{off}} \sim 100$ s

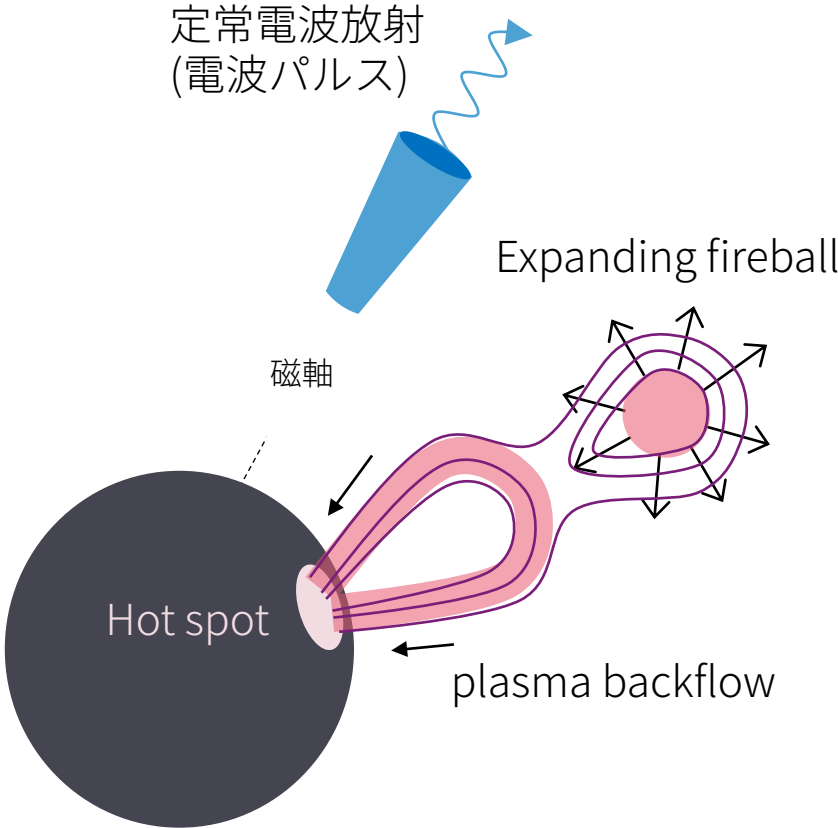
MOTIVATIONS

- 電波パルサーとマグネターの境界が消えつつある現状では、電波パルス観測との組み合わせからマグネターフレア現象の理解が進展すると期待できる
- バースト時に生成したプラズマが粒子加速領域に侵入し、加速電場を遮蔽することで電波生成自体を止めた？
- (Archibald+17)
- しかし、電波消失のタイムスケール(~ 100 s)は、磁気圏の変化($P \sim 0.4$ s)では説明が難しい
- むしろ、プラズマの放出によって電波放射領域が覆われた結果、電波パルスが吸収を受けたのではないか

A MODEL FOR SHORT BURSTS & RADIO SUPPRESSION

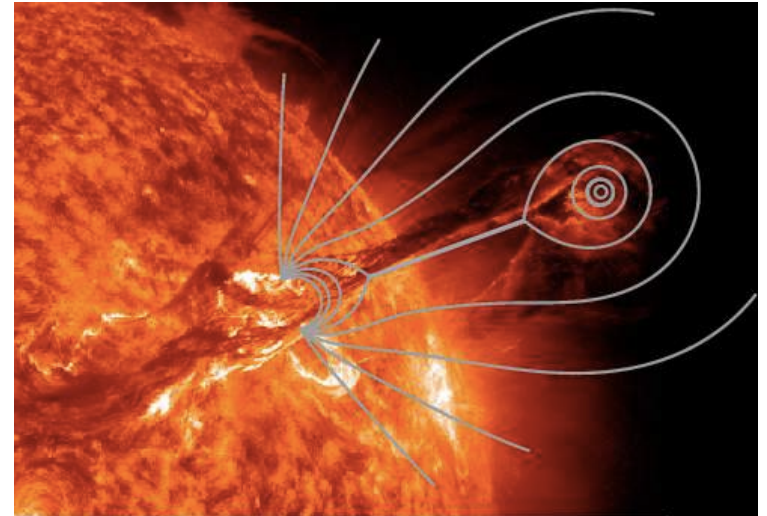
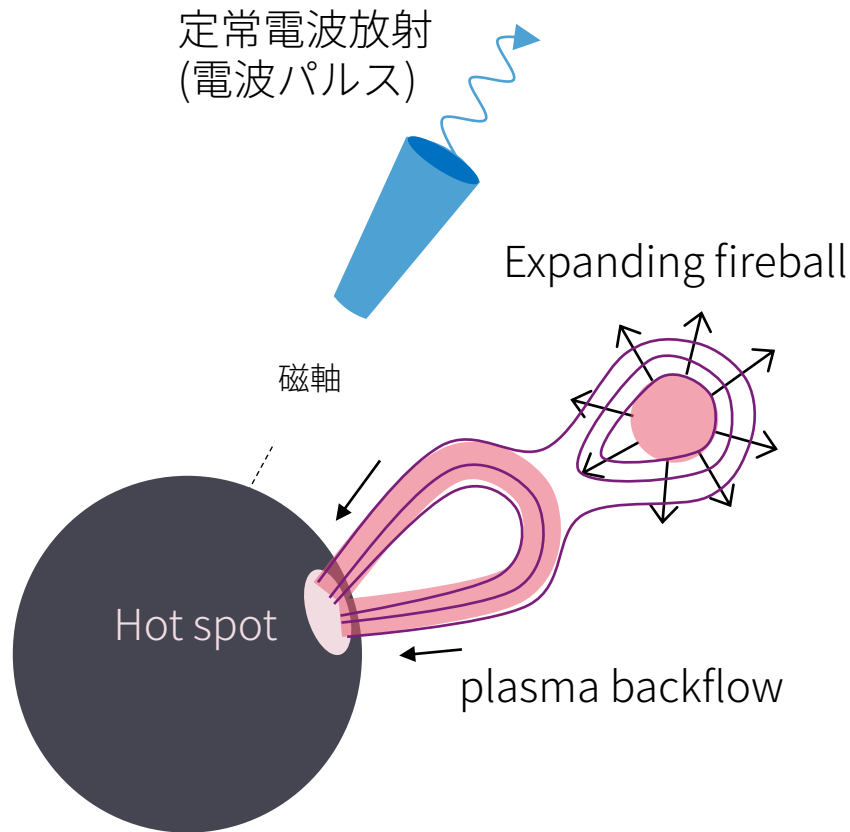


A MODEL FOR SHORT BURSTS & RADIO SUPPRESSION



※ FBが磁気トラップされない状況を想定 (FBの生成高度と磁気散逸過程によってはマグネター級の磁場でなくても起こり得る)

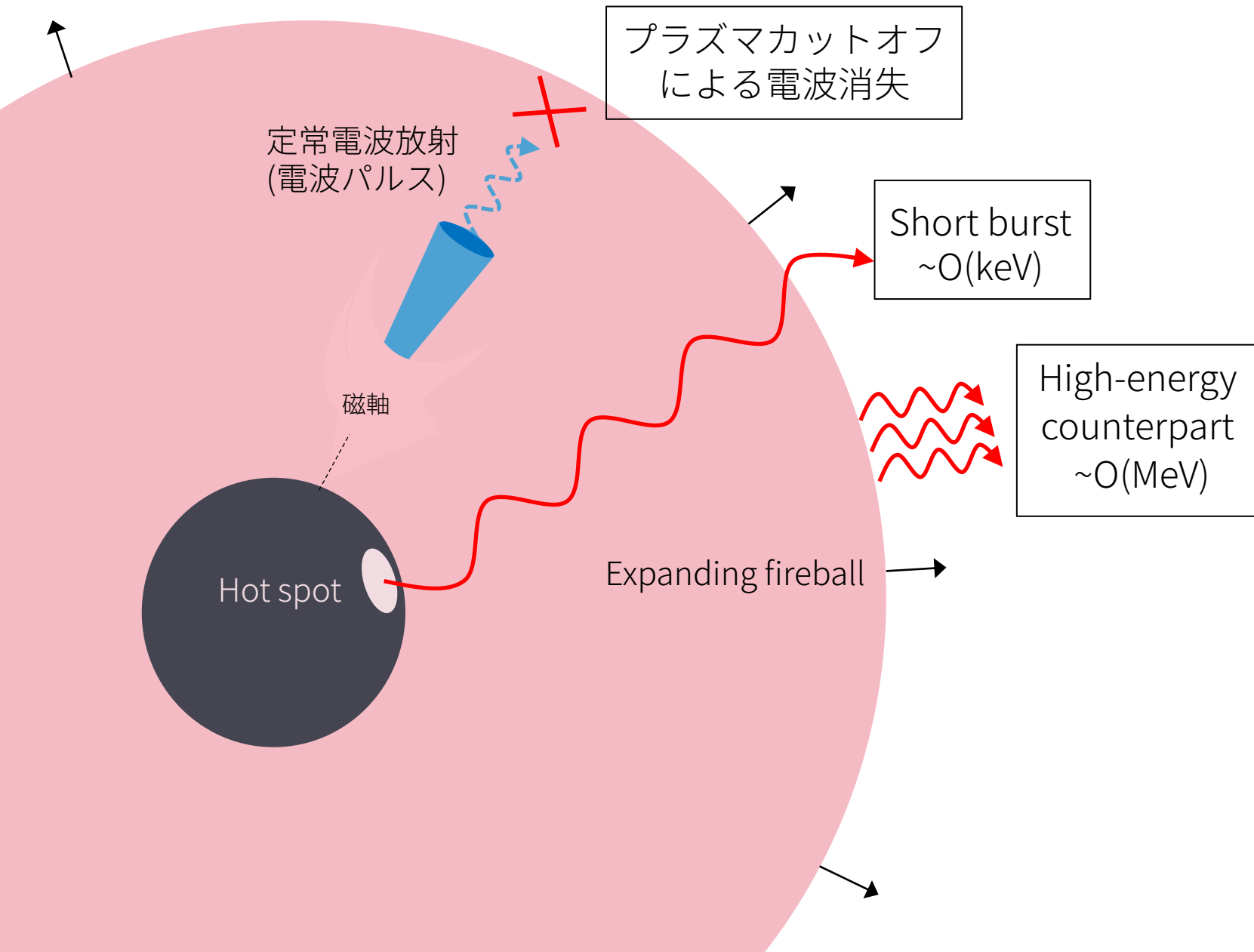
A MODEL FOR SHORT BURSTS & RADIO SUPPRESSION



c.f. 太陽フレアのコロナ質量
放出現象(Meng+14)

※ FBが磁気トラップされない状況を想定 (FBの生成高度と磁気散逸過程によってはマグネター級の磁場でなくても起こり得る)

A MODEL FOR SHORT BURSTS & RADIO SUPPRESSION



3. Missing Links btw. Magnetar Flares & Radio Emission

SY, Kisaka, Terasawa, Enoto 2019

- Short burst の起源

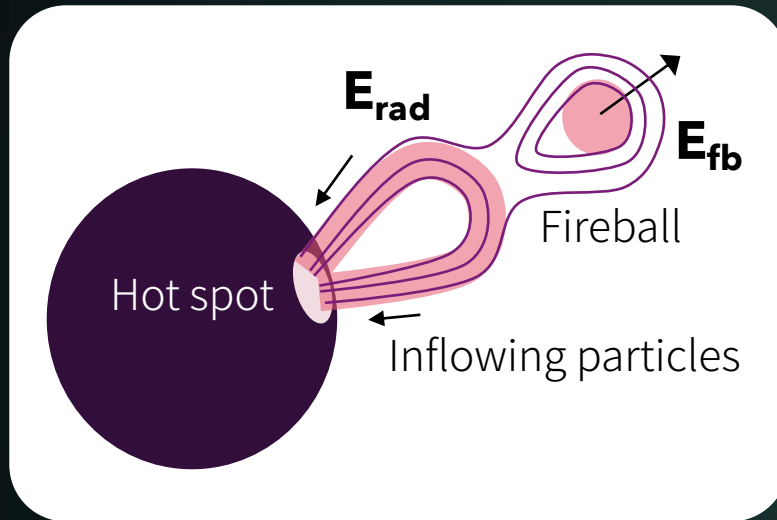
fireball プラズマの一部が星表面を叩いてホットスポットを形成し、継続時間の短いフレアとして観測される可能性を新しく提案

- 電波パルス消失現象の起源

バースト時に光速で放出されるプラズマ流が電波放射を吸収することで、電波パルスが一定時間消失することを理論的に示した

SHORT BURSTS FROM HOT SPOTS

- Some fraction of initial fireball energy (E_{fb}) is used to bombard the NS surface, creating the hot spot(s)



$$E_{fb} = aT_i^4 r_i^3 \sim 10^{40} r_{i,5}^3 \left(\frac{T_i}{m_e} \right)^4 \text{ erg}$$

r_i : initial fireball size

T_i : initial fireball temperature

m_e : e^\pm rest-mass (~ 511 keV)

- E_{rad} ($< \sim E_{fb}$) is thermally radiated away from hot spot (T_{spot} & r_{spot})

$$\Delta t_{rad} \approx \frac{E_{rad}}{\sigma_{SB} T_{spot}^2 4\pi r_{spot}^2} \sim 80 \text{ ms} \left(\frac{E_{rad}}{10^{38} \text{ erg}} \right) \left(\frac{T_{spot}}{10 \text{ keV}} \right)^{-4} \left(\frac{r_{spot}}{1 \text{ km}} \right)^{-2}$$

3. Missing Links btw. Magnetar Flares & Radio Emission

SY, Kisaka, Terasawa, Enoto 2019

- Short burst の起源

fireball プラズマの一部が星表面を叩いてホットスポットを形成し、継続時間の短いフレアとして観測される可能性を新しく提案

- 電波パルス消失現象の起源

バースト時に光速で放出されるプラズマ流が電波放射を吸収することで、電波パルスが一定時間消失することを理論的に示した

ABSORPTION DUE TO PLASMA CUTOFF

- Fireball プラズマの場合、free-free/電子散乱は効かず、プラズマ周波数によるカットオフ吸収が支配的

- Dispersion relation :

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$$

- Plasma frequency:

$$\omega_p \equiv \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

- プラズマ周波数以下 $\omega < \omega_p$ の波は吸収される

- 膨張する fireball のプラズマ数密度の時間発展から電波消失のタイムスケール τ_{off} を推定

$$\omega_{\text{radio}} = \omega(n_e(\tau_{\text{off}}))$$

- **Energy & momentum conservation:**

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \{ r^2 (U + P) \Gamma^2 \beta \} = 0$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \{ r^2 (U + P) \Gamma^2 \beta^2 \} + \frac{dP}{dr} = 0$$

A relativistic outflow with

$$\Gamma \approx \Gamma_i (r/r_i), \quad T \approx T_i (r_i/r)$$

- **Dynamical pair equation (Boltzmann's equation):**

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 n_e \Gamma \beta) = -\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle (n_e^2 - n_{e,\text{eq}}^2),$$

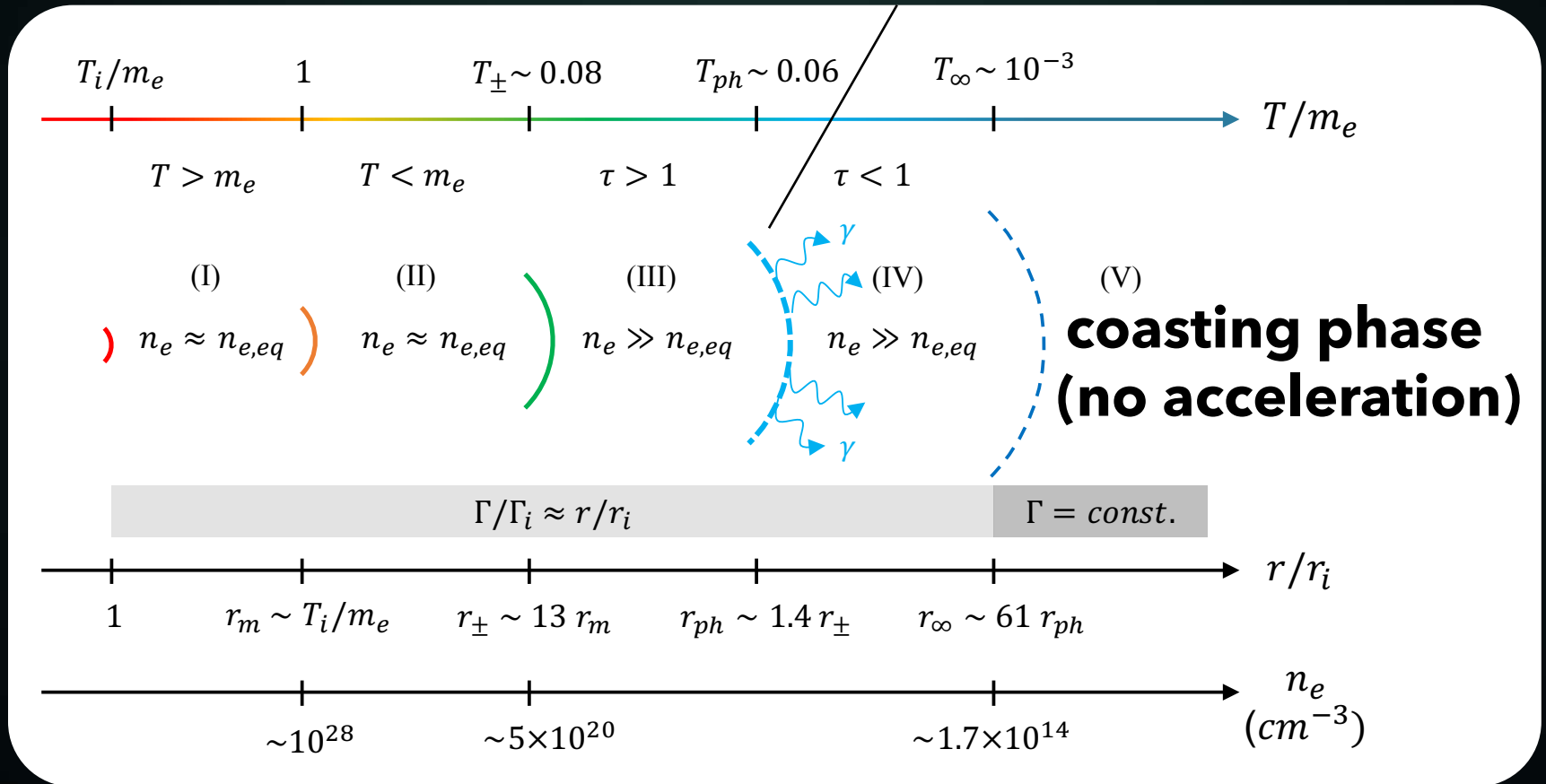
- **Equilibrium pair number density (initial condition)**

$$n_{e,\text{eq}}(T) \approx \frac{2}{(2\pi)^{3/2}} \lambda_C^{-3} (T/m_e)^{3/2} e^{-m_e/T}$$

$$\sim 10^{28} (T/m_e)^{3/2} e^{-m_e/T} \text{ cm}^{-3}$$

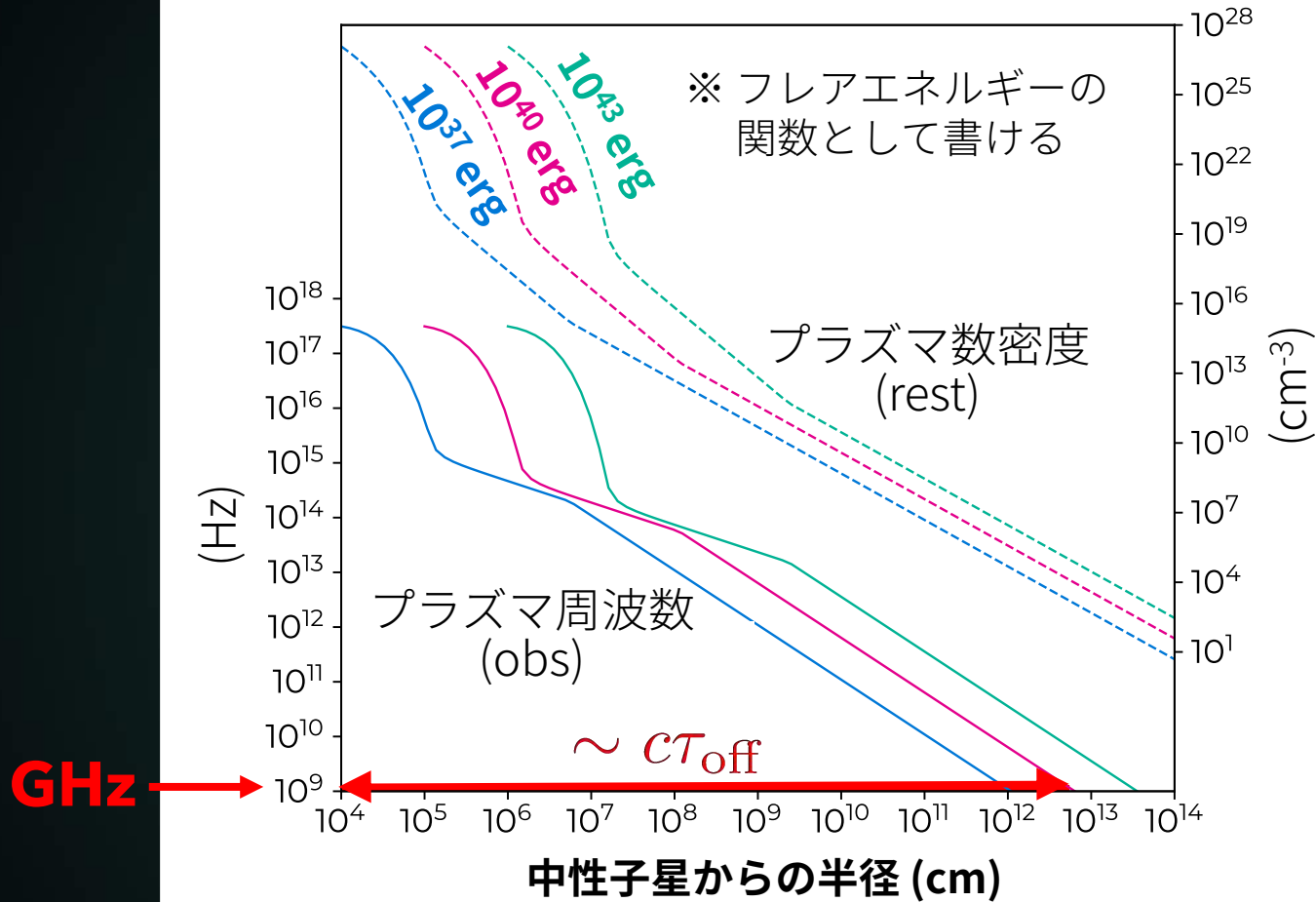
CLASSICAL FIREBALL EVOLUTION

3 initial parms. : r_i (size), T_i (temperature), Γ_i (velocity)
 radiation starts to escape from the photosphere



radiation-dominated \longrightarrow matter-dominated

RADIO SUPPRESSION TIMESCALE

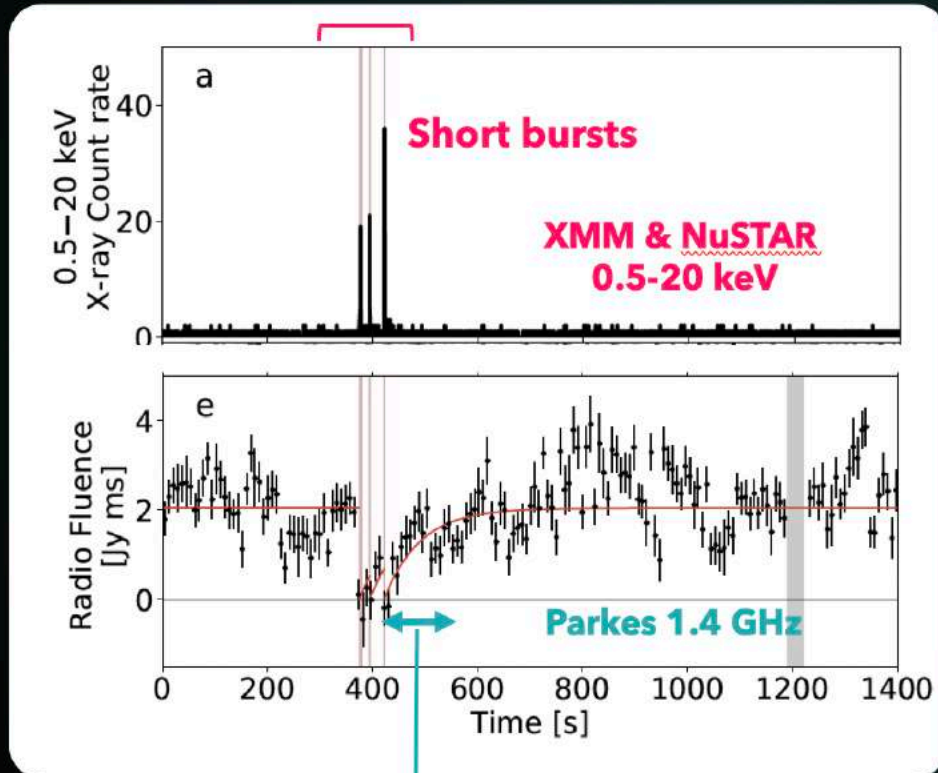


電波放射消失の
タイムスケール

$$\tau_{\text{off}} \approx 470 \text{ s} \left(\frac{r_{\text{fireball}}}{1 \text{ km}} \right)^{-7/8} \left(\frac{E_{\text{fireball}}}{10^{40} \text{ erg}} \right)^{1/2} \nu_9^{-1}$$

APPLICATION TO RADIO PULSAR J1119-6127

- Durations ~ a few seconds for each
- $E_{\text{rad}} \sim 10^{37}$ erg with ~2 keV blackbody



- Radio suppression timescale $\tau_{\text{off}} \sim 100$ s

Short bursts はホットスポットからの放射として説明可能

- size = 1km
- $T_{\text{spot}} = 2$ keV
- $E_{\text{rad}} = 10^{37}$ erg
- $\Delta t_{\text{rad}} = \text{a few sec}$

これらはX線観測と consistent

電波消失のタイムスケール $\tau_{\text{off}} \sim 100$ sec はエネルギー $E_{\text{fb}} = 10^{38}$ erg ($T_i \sim 300$ keV, $r_i = 1$ km) のfireball プラズマの膨張により説明できる

CONCLUSIONS OF PART 3

- Short burst の起源として、fireball プラズマの一部が星表面を叩いて形成したホットスポットからの表面放射を新しく提案
- バースト時に光速で放出されるプラズマ流が電波放射を吸収することで、電波パルスが一定時間消失することを理論的に示した
- 電波消失のタイムスケールはフレアのエネルギーで決まるため、電波放射を伴うマグネターに対するSKA 等による詳細な電波観測から、**X線帯域では検出が難しい小さなフレアの発生頻度が制限できる可能性がある**
- 今後の**X線と複数電波バンド**の同時観測により本モデルが検証可能

4. Spectral Modification of Magnetar Flares by Resonant Cyclotron Scattering

SY, Lyubarsky, Granot, Gogos 2020, submitted to MNRAS

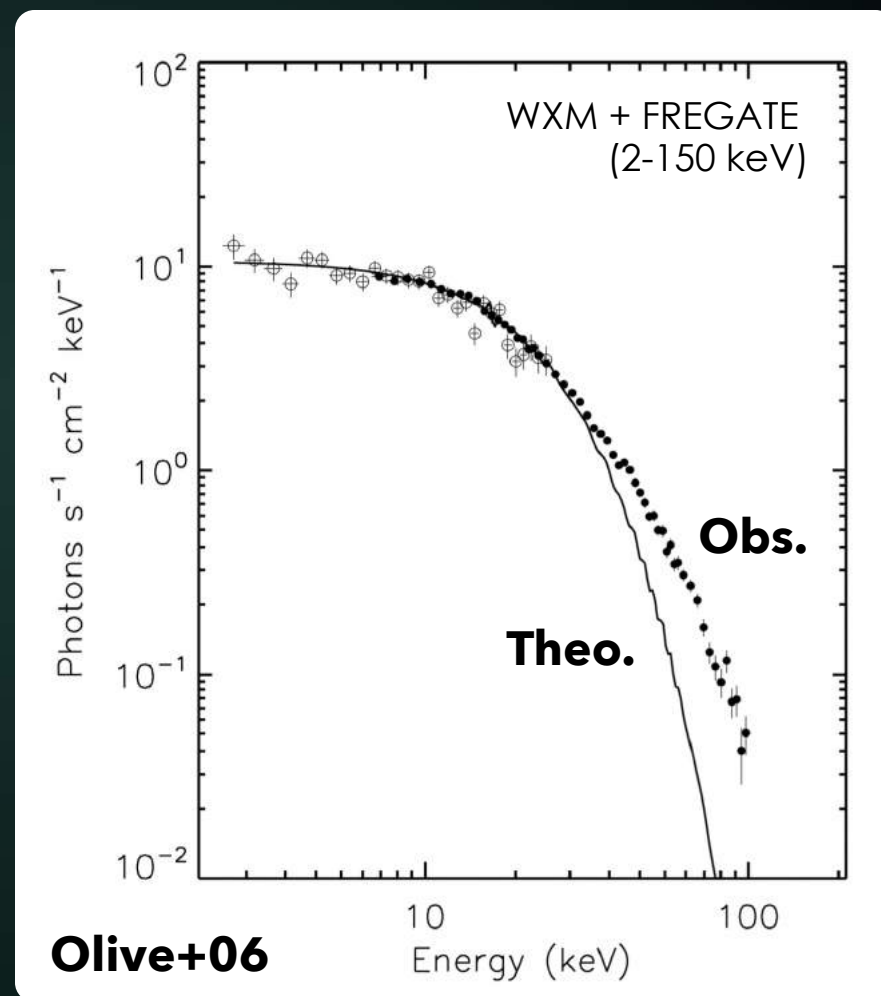
- 明るいマグネターフレア※の起源

Trapped fireball からの熱的放射が磁気圏のサイクロトロン共鳴散乱によって変化するモデルを提案。 Toy model により、観測された中間サイズのフレアスペクトルを説明できることを示した。

※ Trapped fireball が生成する場合(前に扱った short burst よりもエネルギーの大きいフレア)を想定している

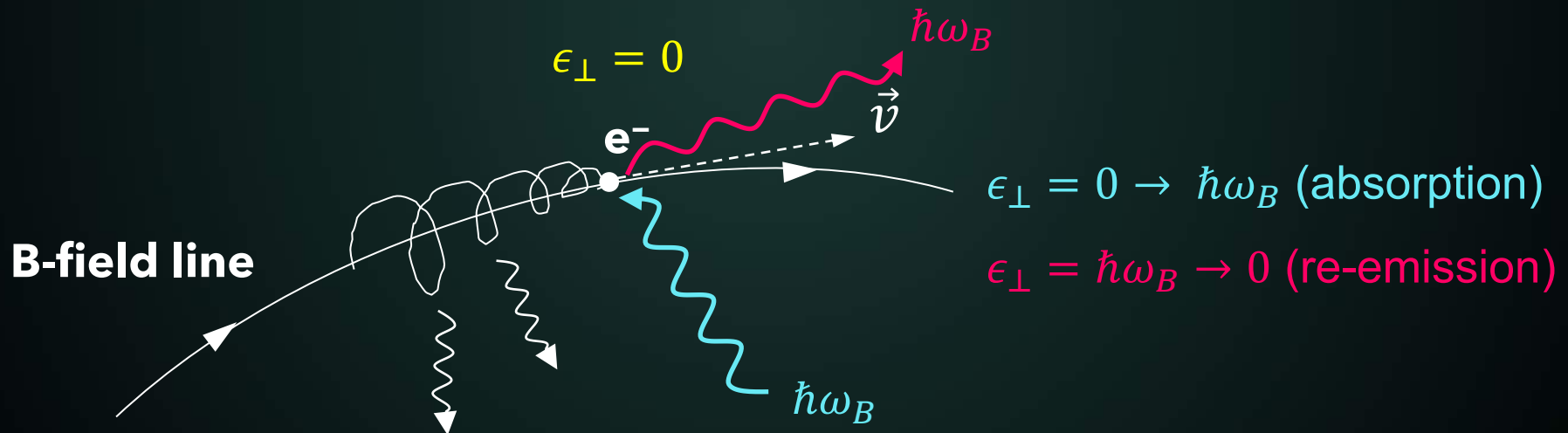
- 理論モデル: trapped fireball からの熱的放射 (Lyubarsky 02)
- 観測は高エネルギー側でモデルよりハードなスペクトルを示す (Olive+06; Israel+08)
- フレアスペクトルの理論・観測の不一致は未解決のまま
- もとのスペクトルが磁気圏における散乱過程で変化?
- サイクロトロン共鳴散乱を考える

An intermediate flare from SGR 1900+14 on 2001 July



RESONANT INVERSE COMPTON SCATTERING

- 電子は磁力線に沿って運動。磁場に垂直な電子の運動量は量子化されており、サイクロトロン周波数に等しいエネルギーの光子を吸収し、光子の入射方向と全く関係ない方向に再放射

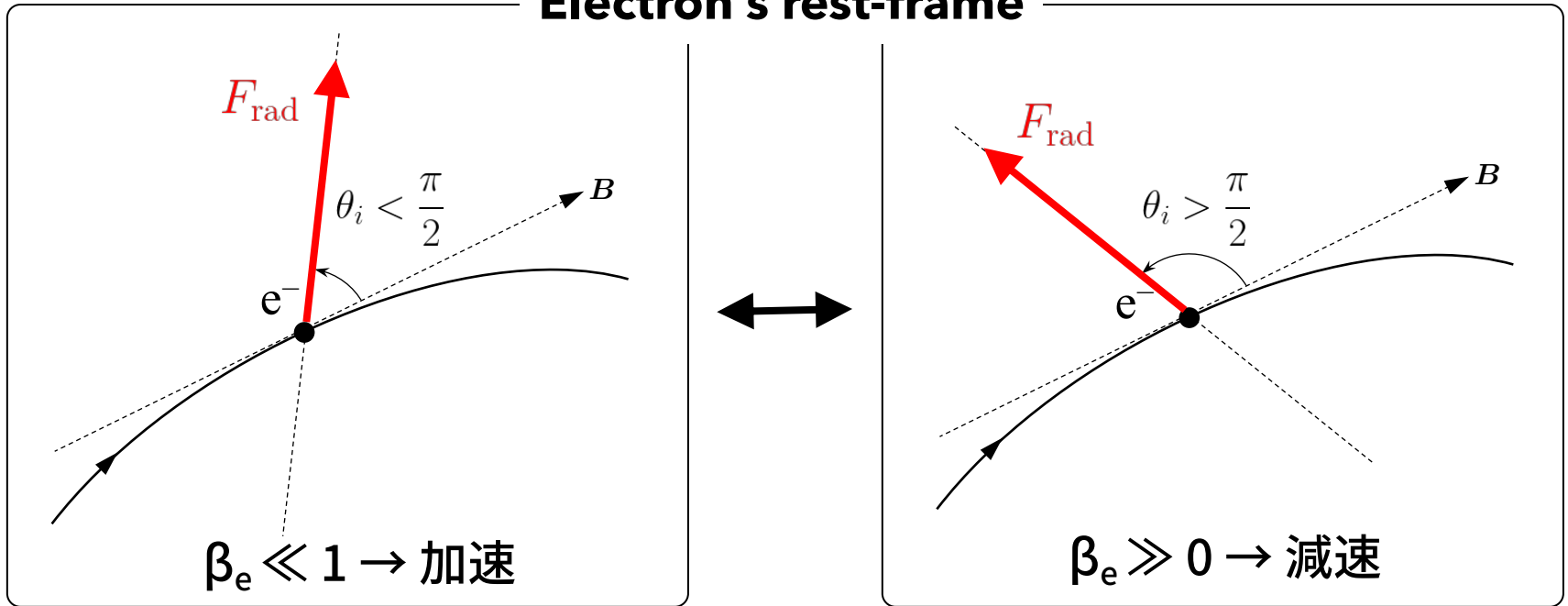


Rapid synchrotron cooling: 10^{-20} - 10^{-16} s

RESONANT INVERSE COMPTON SCATTERING

- 電子は磁力線に沿って運動。磁場に垂直な電子の運動量は量子化されており、サイクロトロン周波数に等しいエネルギーの光子を吸収し、光子の入射方向と全く関係ない方向に再放射
- 散乱電子が相対論的な速度で運動する場合、ドップラーシフトにより、散乱後の光子のエネルギーが増加する (=サイクロトロン共鳴逆コンプトン散乱)
- フレア時の磁気圏粒子は trapped fireball からの強い radiation force に運動を支配されるため、結果として mildly relativistic な速度(ローレンツ因子 ~ 1)で運動する

Electron's rest-frame



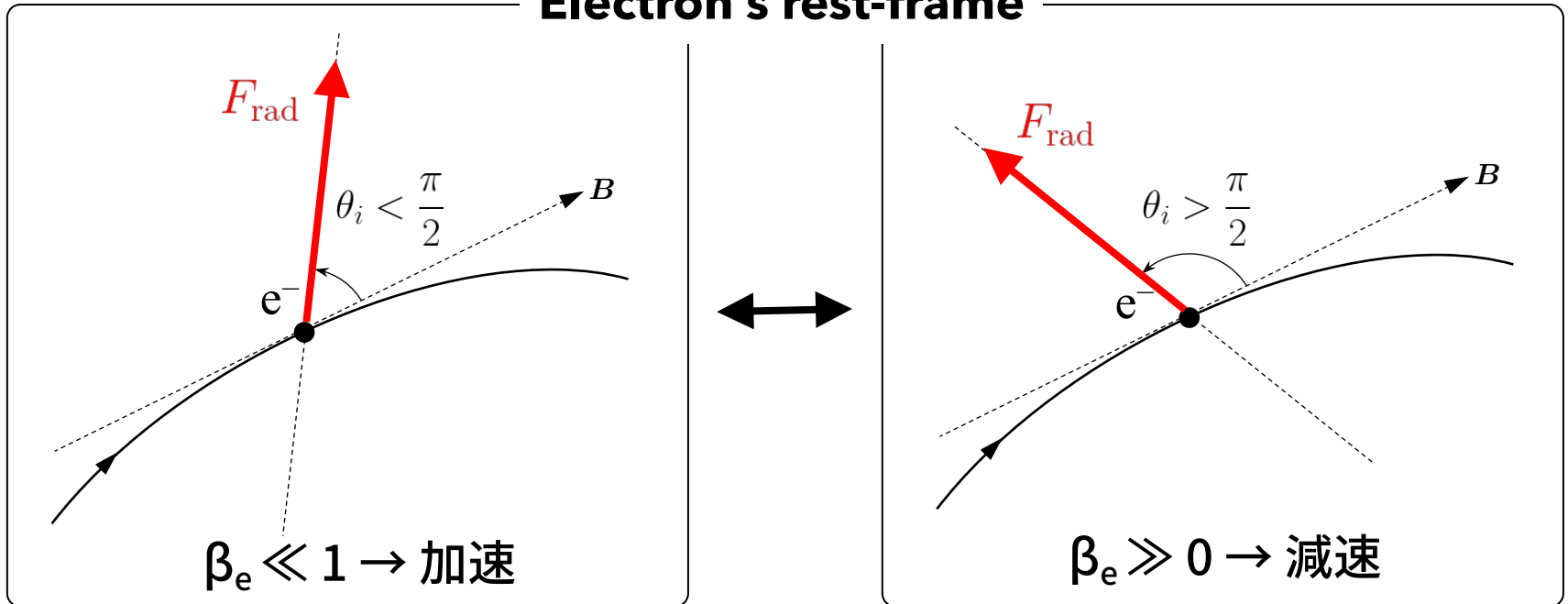
- In the electron's rest-frame, radiation force acts on a particle in perpendicular direction to the local magnetic field so that electrons do not gain or lose the kinetic energy

$$\cos \theta_i = \frac{\cos \Theta_i - \beta_e}{1 - \beta_e \cos \Theta_i}$$

θ_i 電子静止系での光子入射角

Θ_i 観測者系での光子入射角

Electron's rest-frame



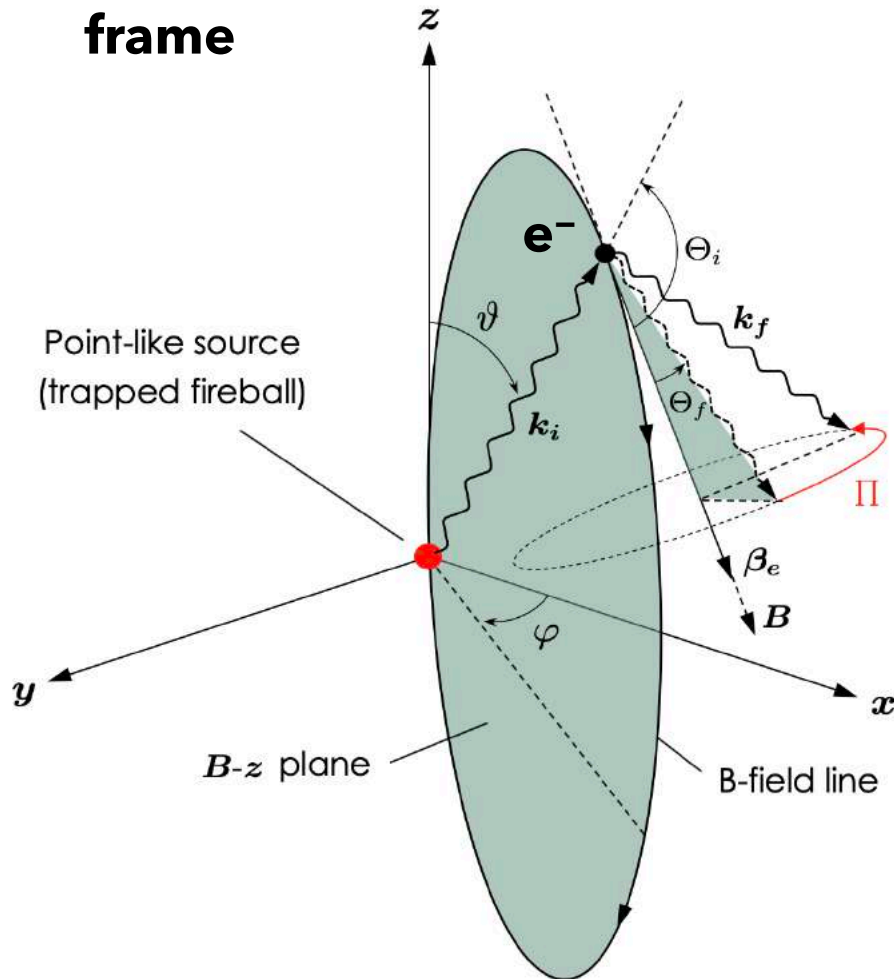
- In the electron's rest-frame, radiation force acts on a particle in perpendicular direction to the local magnetic field so that electrons do not gain or lose the kinetic energy

$$\cos \theta_i = \frac{\cos \Theta_i - \beta_e}{1 - \beta_e \cos \Theta_i} = 0 \longrightarrow \boxed{\beta_e = \cos \Theta_i; \quad \gamma_e = 1 / \sin \Theta_i}$$

強輻射場により、一瞬($\sim 10^{-8}$ s)でプラズマ速度場が平衡状態になる

TOY MODEL

Observer frame



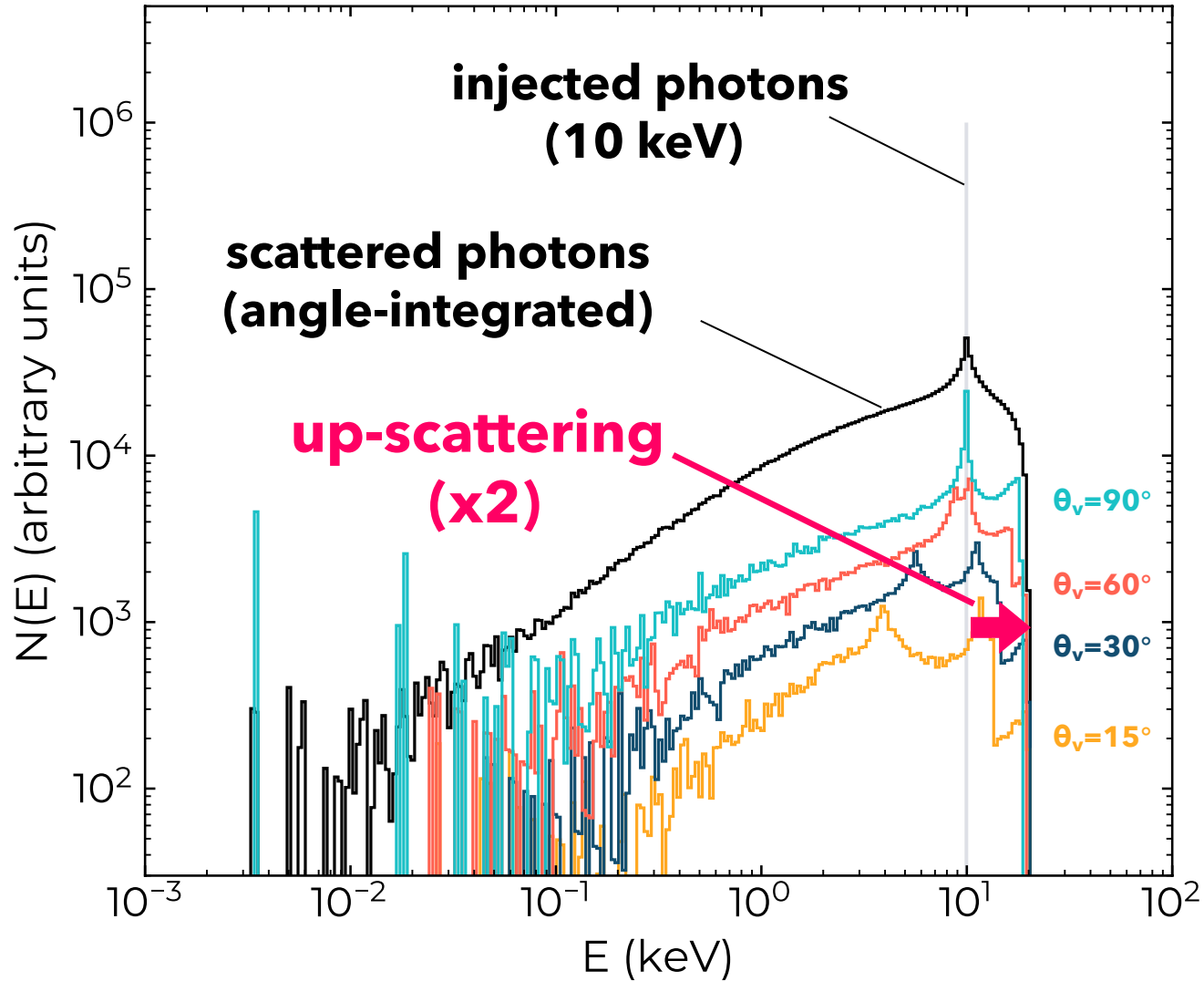
- Fireball = point-like source with initial spectrum (Lyubarsky 02)

$$N(\epsilon) \propto \epsilon^2 \left\{ \exp \left[\frac{\epsilon^2}{T_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon^2 + (3\pi^2/5)T_{\text{eff}}^2}} \right] - 1 \right\}^{-1}$$

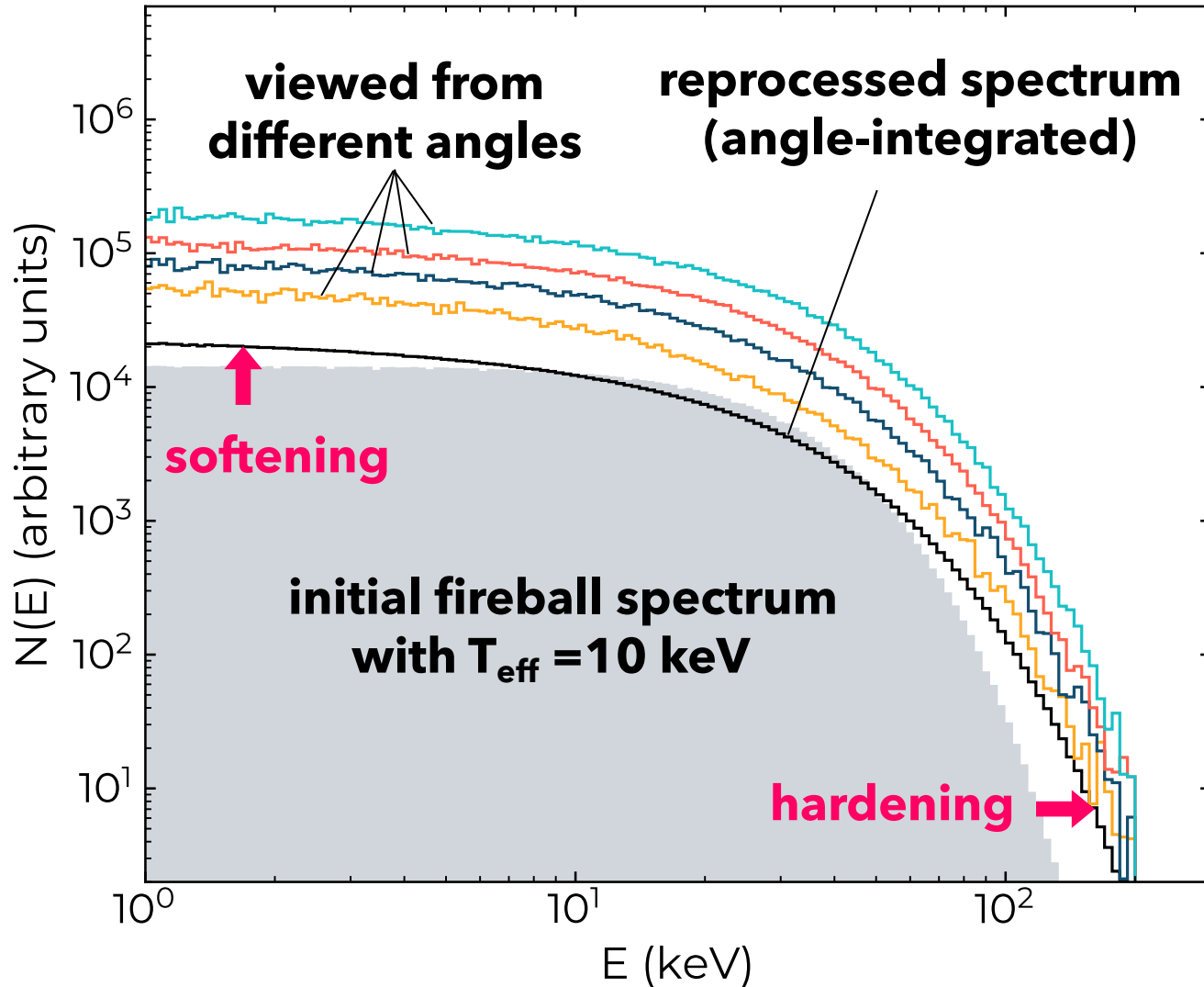
(T_{eff} : effective FB temperature)

- Dipole field geometry
- Aligned rotator (spin axis = magnetic pole = z-axis)
- Single scattering を仮定
- 3D Monte Carlo Simulation

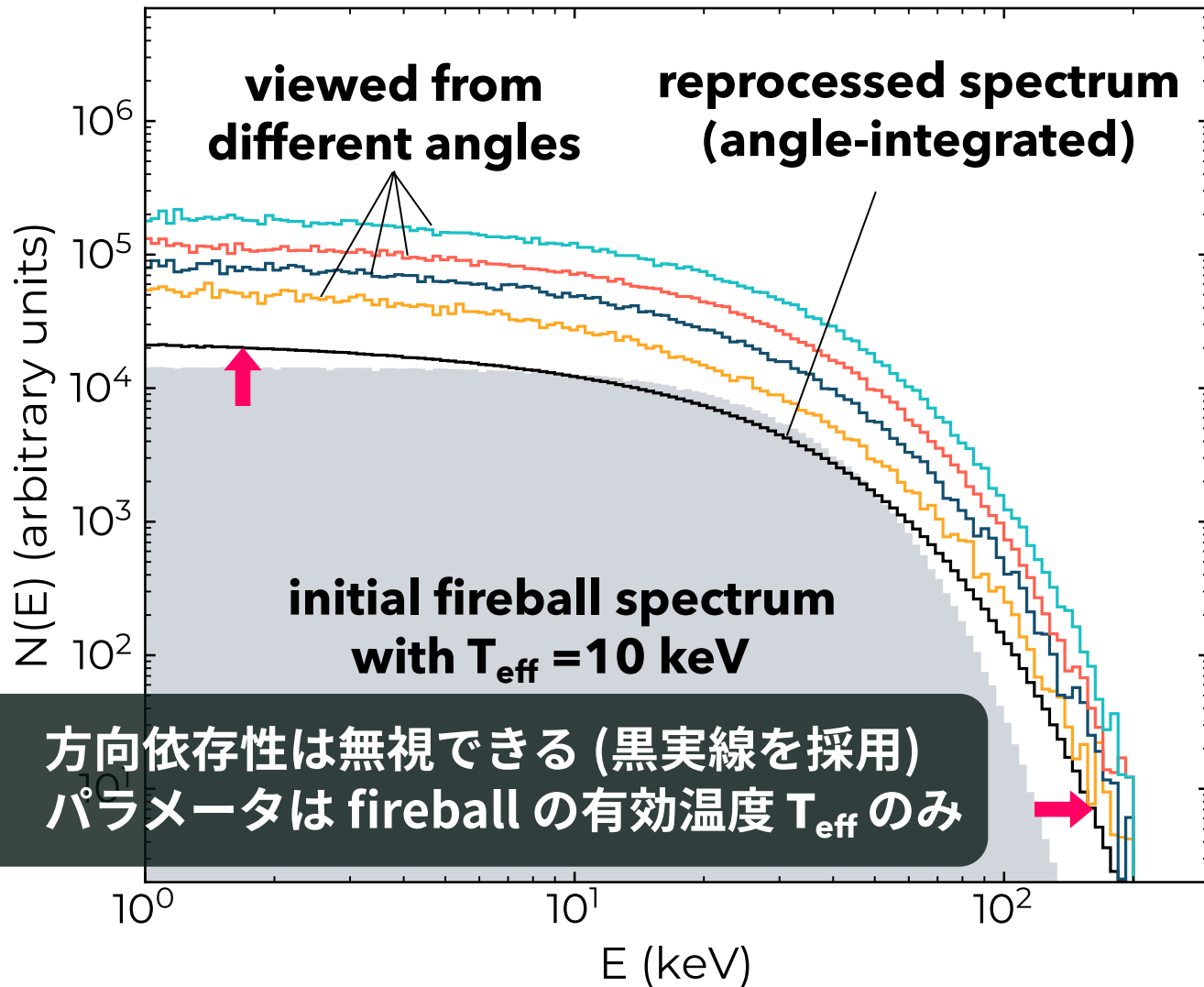
REPROCESSED SPECTRA (single-energy case)



REPROCESSED SPECTRA (full energy range)



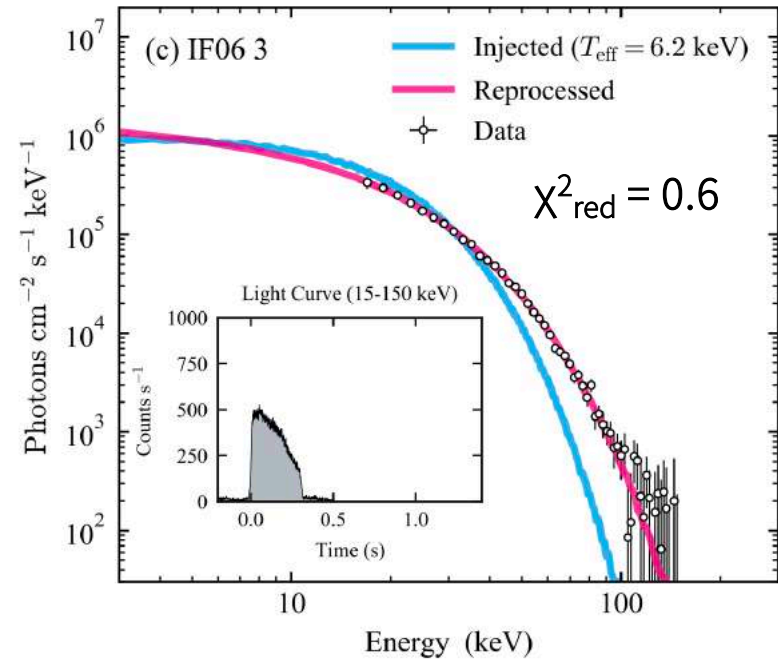
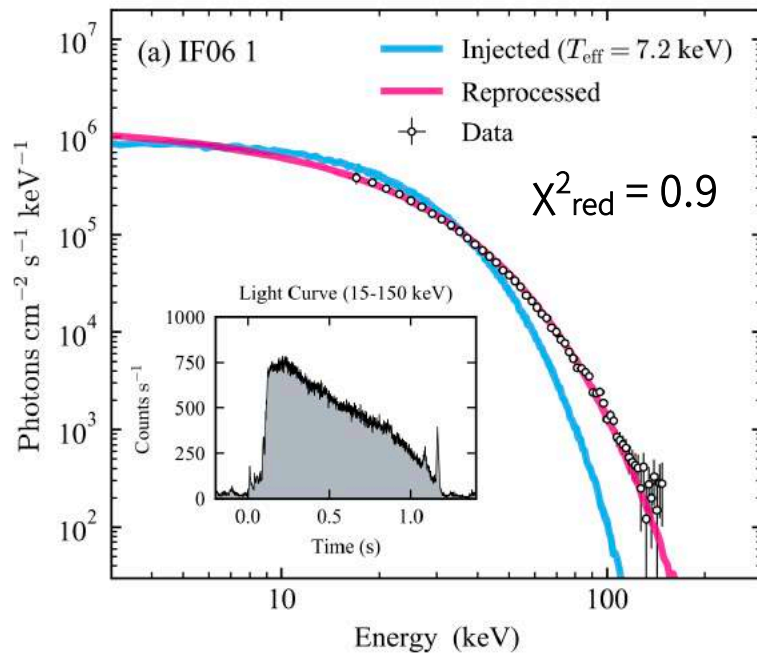
REPROCESSED SPECTRA (full energy range)



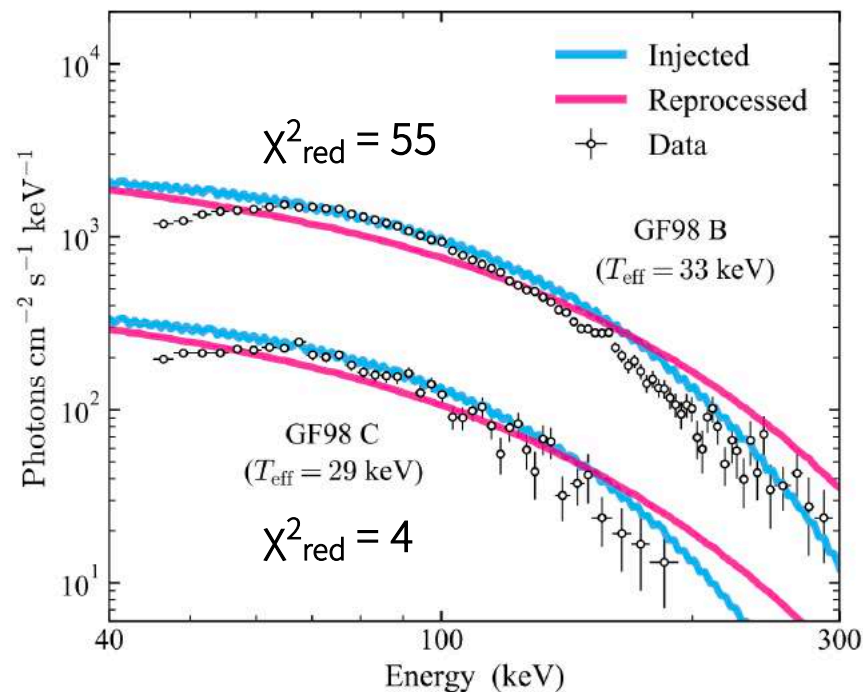
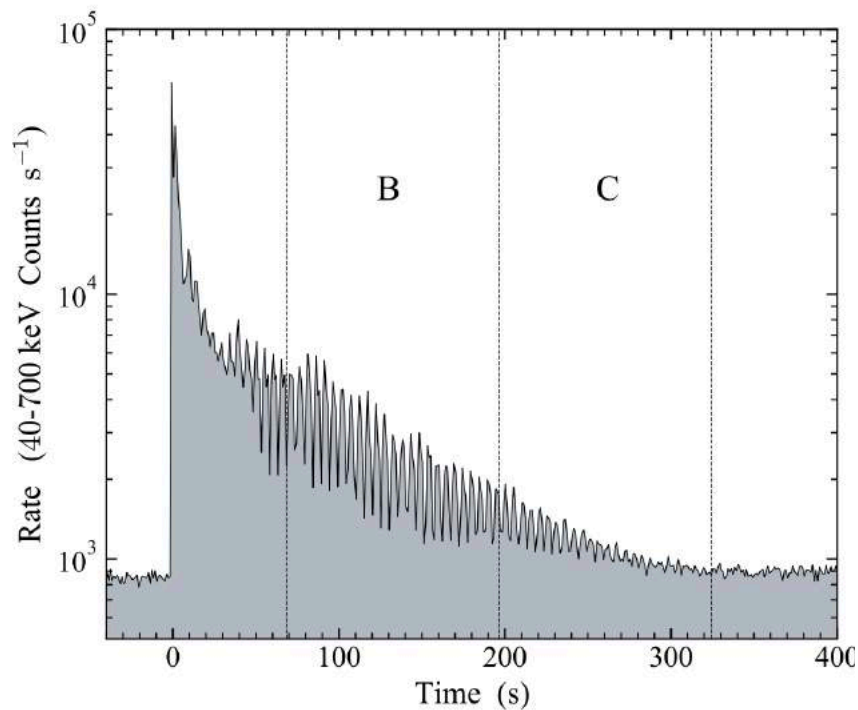
APPLICATION TO FLARES FROM MAGNETAR SGR 1900+14

Burst	Energy Range (keV)	Time (UT)	Duration (s)	Luminosity ^a (erg s ⁻¹)	Energy ^a (erg)
IF06 1	15–100	02:53:13.3	1.2	1.5×10^{41}	1.8×10^{41}
IF06 2		02:53:15.4	1.2	1.0×10^{41}	1.2×10^{41}
IF06 3		02:53:22.3	0.34	1.1×10^{41}	3.7×10^{40}
GF98 B	40–700	10:23:24.1	128	2.9×10^{40}	3.7×10^{42}
GF98 C		10:25:32.1	128	4.6×10^{39}	5.9×10^{41}

- マグネター SGR 1900+14 ($B_p=7 \times 10^{14}$ G/ $P=5.20$ s/ $D \sim 10$ kpc) のイベントをを再解析してスペクトルを得た
 - 2006年の中間フレア(IF) by **Swift/BAT (15-100 keV)**
 - 1998年の巨大フレア(GF) by **BeppoSax/GRBM (40-300 keV)**
- いずれも 光度 $> 10^{40}$ erg/s の非常に明るいフレア
→ 平衡状態の散乱粒子速度場は実現されているはず
- 星間物質による光電吸収($< \sim 5$ keV)は無視できる



- モデルは **SGR 1900+14 の中間フレアと驚くほど整合** ($\chi^2_{\text{red}} < \sim 1$)
- **FB 光源の点様近似も成り立っている**
 - **FB の実効温度 = 6-7 keV \rightarrow FB サイズ $\sim 2 R_{\text{NS}}$**
 - **共鳴散乱が起こる平均位置 $\sim > 10 \gamma_e^{1/3} R_{\text{NS}}$**
- **single scattering picture で良い = 共鳴散乱の optical depth $\sim 0(1)$**
 - **共鳴散乱が起こる位置でのプラズマ密度 $\sim 10^3 n_{\text{GJ}}$**



- モデルは **SGR 1900+14 の歴史的 giant flare とは不整合 ($\chi^2_{\text{red}} \gg 1$)**
- 我々のモデルが予言する速度場は実現されているはずだが、以下の理由から単純な single scattering モデルは適用できない可能性
 - 128 s/P ~ 25 cycle の長時間積分したスペクトル (複数回散乱)
 - 磁気圏内の電荷密度が大き過ぎる (複数回散乱)
 - FB のサイズが大きく、光源の点的近似が成り立たない

CONCLUSION OF PART 4

サイクロトロン共鳴逆コンプトン散乱を考慮し、明るいマグネターフレアスペクトルの理論モデルを初めて構築

- フレア中の散乱電子の運動は強い輻射力に支配され、mildly-relativistic になる
- 散乱効果により、高エネルギー側でのスペクトルカットオフがハードに変化
- モデルパラメータは Trapped fireball の有効温度 T_{eff} のみ

マグネターSGR 1900+14 からの中間サイズのフレアスペクトル($\sim 10^{41}$ erg/s)を非常に良く説明できる

- Single scattering でも十分説明可能
- fireball の有効温度は 6-7 keV , サイズは星半径の2-3倍に相当

今後は様々なソース・エネルギーのフレアへ適用を行う