

電波観測によるアクション ダークマター探し

～MONSTER計画の紹介～

VLBI懇談会将来計画検討・極限天体班

赤堀卓也 (国立天文台/SKA天文台)

MONSTER計画検討協力者

新沼浩太郎(山口大, Rd), 藤沢健太(山口大, Rd), Sujin Eie (東大, Rd),
榎戸輝揚(理研,Xy), 寺澤敏夫(国立天文台, Rd/Th),
前田啓一(京都大, Op), 木坂将大(広島大,Th), 藤田智弘(東工大,Th)

背景

宇宙最強磁場の起源と極限物理法則の探求

MONSTER計画

*Monitoring Observations of the Neutron Stars
That Evolve Rapidly*



©Astronomy.com

2020年11月

【配布厳禁・取扱注意】

本書はVLBI懇談会の将来計画WGの極限天体SWGから提案する計画の一部のための、いわゆるサポート文書として取りまとめたものであるが、本書単独でも中規模計画の提案書としてある程度成り立つように意識してとりまとめてある。

本書の内容には覚え書きや伝聞が含まれるため、一部は正確性を期していない可能性がある。本書を参照される際には、都度事実確認をすることを推奨する。

・国立天文台はVLBI*専用望遠鏡「VERA」を運用中

- VLBI「専用」鏡は実は少ない
- 基幹プロジェクト「銀河系測量」終了
(VERA Collaboration 2021 PASJ, 72, 50;
PASJ high impact article #1 of Altmetric)
- 望遠鏡がなくなるわけではない

・2022年度以降のテーマの立案へ

- VLBI懇談会で検討
 - 報告書→ [https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/vcon/WG/FuturePlan2020/
Report20210616/VLBI_FuturePlanWG_Report_v4.pdf](https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/vcon/WG/FuturePlan2020/Report20210616/VLBI_FuturePlanWG_Report_v4.pdf)
- 極限天体(中性子星やFRB)を頼まれ、「MONSTER計画」を提案した
 - 2倍程度に高感度化(冷却受信機)
 - 6倍程度に広帯域化(新設計の給電部)



VLBI将来計画

1. 学術的な背景(1/2)

■パルサー発見(1967)から半世紀、既知の中性子星は3000天体強

- 自転周期Pと変化率P*に多様性
→ 種族ごとに豊かな性質ある

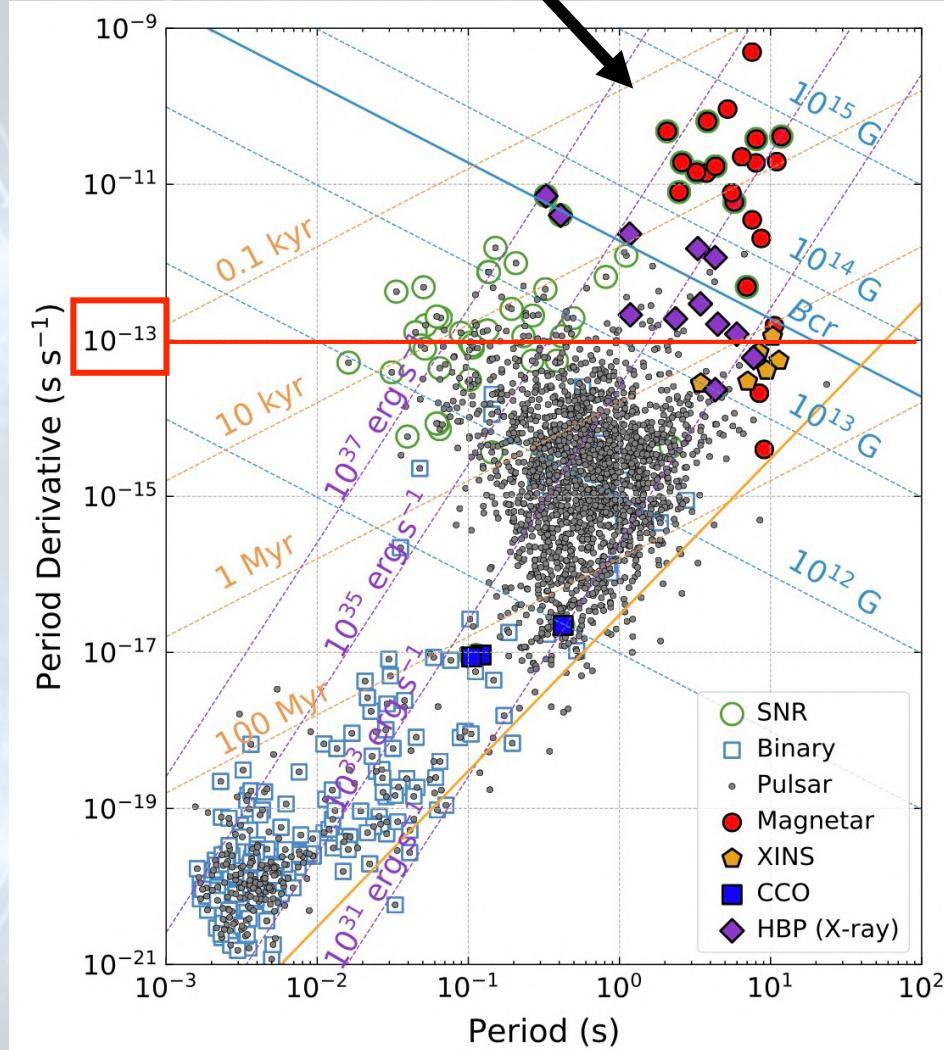
■P*大の若い中性子星に着目

- 宇宙最強磁場を持つ孤立系
 - 量子臨界磁場を超える
- 巨大パルス、アウトバースト(増光現象), グリッジ(自転変化)起きる
 - ✓ 回転駆動型パルサー(RPP)
 - ✓ 強磁場パルサー(HBP)
 - ✓ マグネター(MAG)

■なぜ今、マグネターVLBI観測？

- マグネター電波バーストの発見
- マグネターがSLSNを駆動？
- マグネターがFRBの起源？

宇宙最強磁場の起源と極限物理法則の探求



Enoto, Kisaka, Shibata 2019

1. 学術的な背景(2/2)

■自転減速と双極磁場

- ・スピンダウン光度 L_{sd}
- ・磁気双極子放射 M1 の光度 L_{md}
- ・仮定: $R, M, L_{md} = L_{sd}, \phi = 90^\circ$
双極磁場強度 B_d は

$$B_d = \sqrt{\frac{3c^3 I}{2\pi^2 R_{ns}^6} P \dot{P}}$$

これ→

■特性年齢 $\tau_c = P/2P^*$

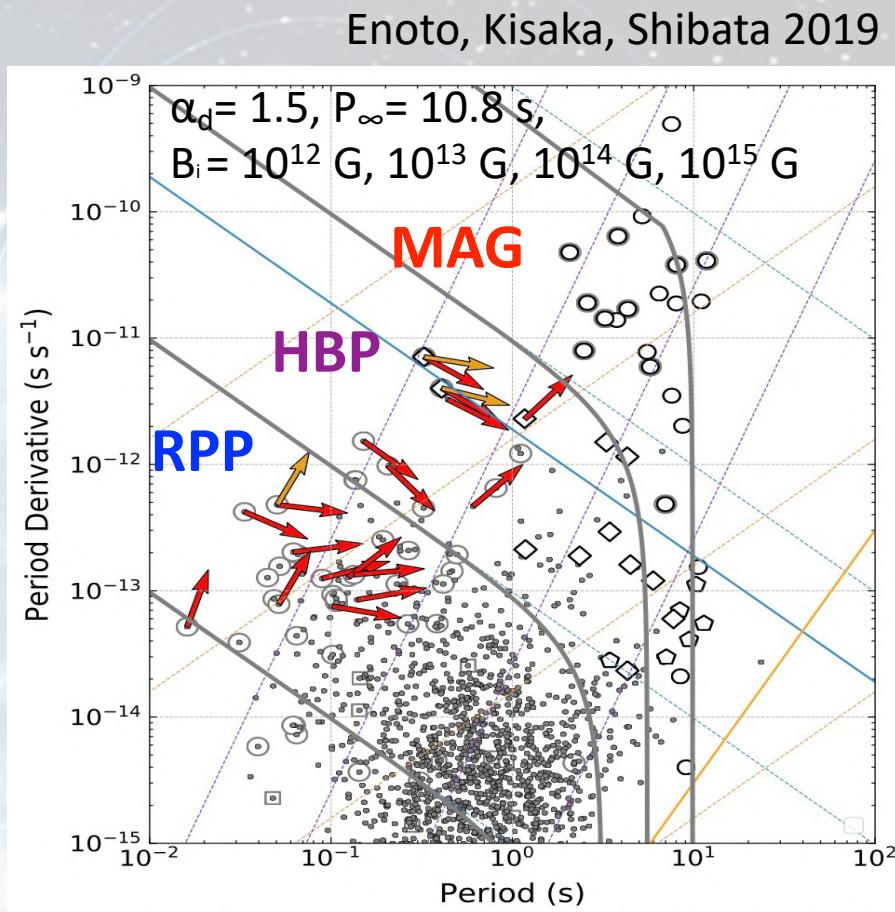
- ・自転速度 初期 << 現在, $L_{md} = L_{sd}$ 仮定
✓ カニパルサー(965歳) $\tau_c = 1250$ 歳(+30%)
- ・グリッジの影響大 → P, P^* の計測難

■進化の経験的パラメタライズ

- ・減速が速度の幕乗 → **減衰指数n**

- ✓ Particle wind breaking → $n=1$ $\dot{\Omega} = -k\Omega^n$
- ✓ EM breaking ($L_{md} = L_{sd}$) → $n=3$ $\dot{P} \propto P^{2-n}$
- ✓ GW breaking → $n=5$

- ・磁場減衰が磁場 の幕乗($0 < \alpha < 2$) $\frac{dB}{dt} = -aB^{1+\alpha}$



RPP、HBP、MAGの曲線は交わらない →
中性子星は誕生時(または誕生後早期)に
すでに**豊かな個性と多様性を持つ?** →
個性は時間を経て小さくなっていく?

2. 学術的な問い合わせ

Q: P-P*上で広く分布するのはなぜか？

Q: P-P*上をどのように進化するか？

Q: 若いにもかかわらず半数程度で親超新星残骸が見つからないのはなぜ？

Q: 種族ごとに親の超新星や超新星残骸に何か特徴は見られないだろうか？

Q: MAGはMAGとして生まれるのか？

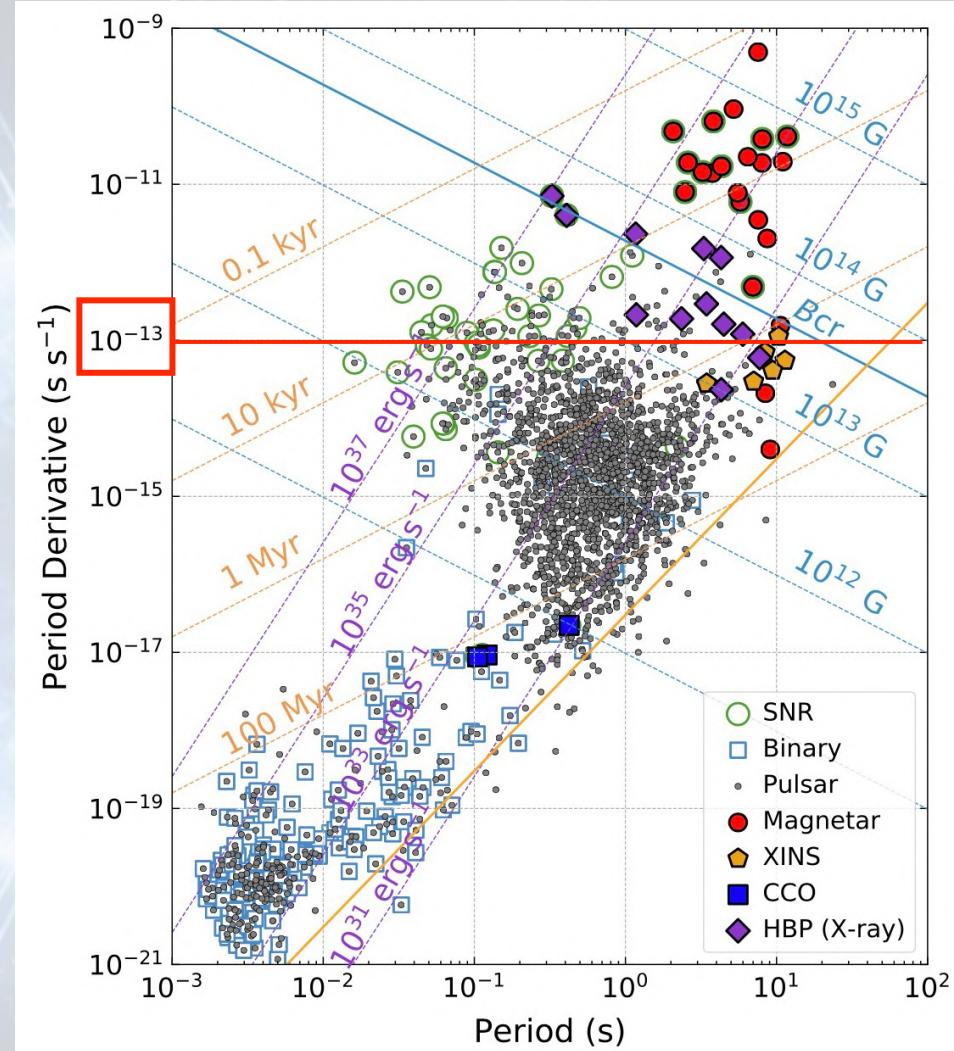
Q: 年齢100歳未満は図のどこに登場？

Q: 若い中性子星は並のパルサー？

Q: 中性子星からなぜ電波が出るか？

Q: 定常パルス、巨大パルス、アウトバーストの放射メカニズムの違いは？

3大テーマに集約
中性子星の誕生と進化の謎
若い中性子星の性質の謎
中性子星の電波放射の謎



Enoto, Kisaka, Shibata 2019

2. 学術的な問い合わせ(1/3)

中性子星はどのように生まれ進化するのか？

■事実：中性子星は運動・超新星残骸は膨張

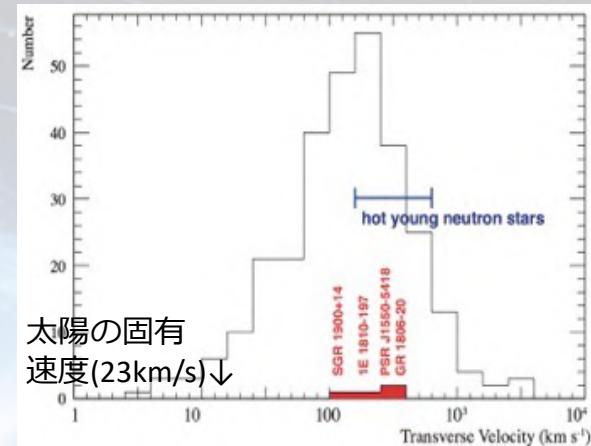
- 中性子星の固有運動速度 v
 - ✓ 典型的に $v \sim 200 \text{ km/s} \sim 40 \text{ mas/yr} (d/\text{kpc})^{-1}$
- 残骸の直径 D ($E = 10^{51} \text{ erg}$, $M = 1 \text{ Mo}$, $n = 1 \text{ cm}^{-3}$)
 - ✓ $D(\text{自由, 断熱, 冷却}) = 2\text{pc} (t/0.1 \text{ kyr}), 25\text{pc} (t/10 \text{ kyr})^{2/5}, t^{1/4}$

■課題：若い(P^* 大)中性子星の半数程度で親超新星残骸が未同定

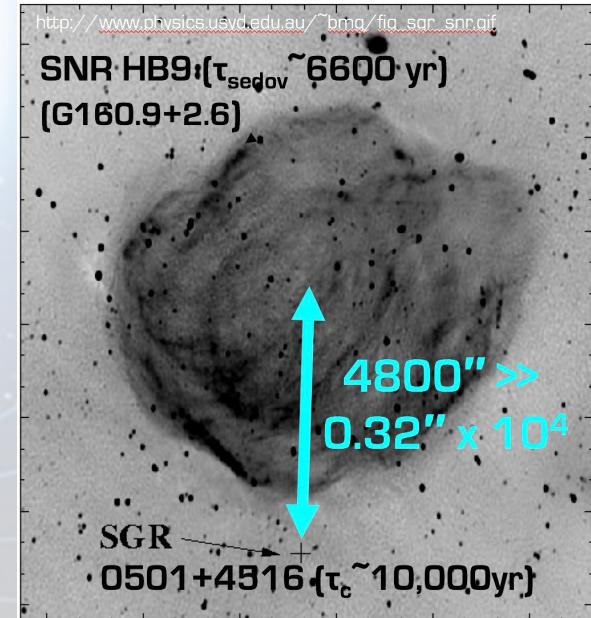
- 典型的な $\tau \sim 10 \text{ kyr} \ll$ 残骸からの脱出時間 $\sim 210 \text{ kyr}$
 - ✓ P^* 大の中性子星は v が総じて大きい? → 超新星爆発や中性子星誕生に重大な発見
 - ✓ 特性年齢 τ が実年齢を大幅に過小評価? → 新展開!

■解決策：中性子星のVLBI位置天文観測

- 中性子星の距離と運動速度を精密に計測
- 親超新星残骸を探し出して関連付け
- 超新星残骸の年齢と特性年齢を比較



中性子星の天球面移動速度(Enoto+19)



2. 学術的な問い合わせ(2/3)

若い中性子星はどのような性質をもっているのか？

■事実：残骸中心に中性子星が存在

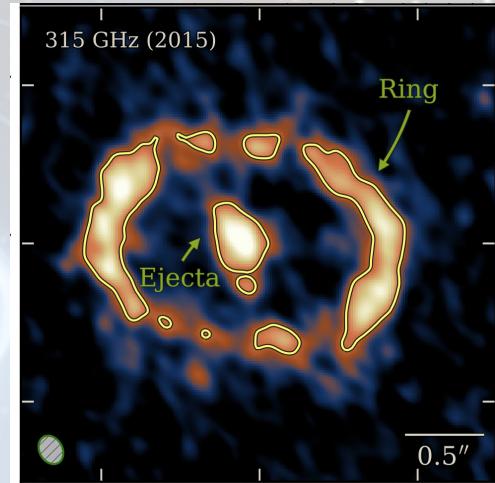
- ・カニ星雲 SN1054 (965歳)
 - ✓ 明月記 → 900年後の1968年にパルサー($P=33\text{ msec}$)発見
- ・大マゼラン雲のSN1987A (33歳)?

■課題：進化初期の中性子星の電波観測が未達

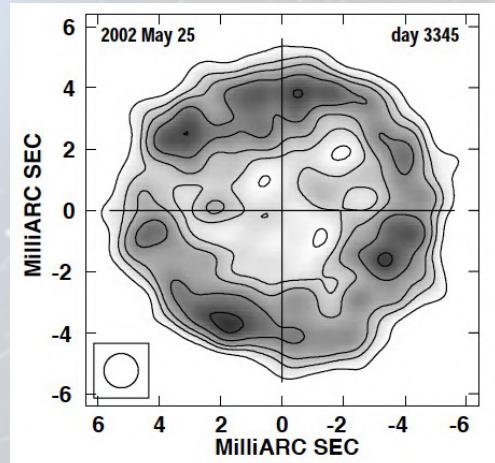
- ・特性年齢1000年以下のP-P*図域が空白
 - ✓ 年齢0(100)年($=P^*$ 大)の中性子星が見つかれば、進化の初期段階という手つかずの研究領域の大きなブレイクスルー
 - ✓ 若い強磁場中性子星の発見はFRBの起源解明にも波及

・解決策：系内＆系外候補のVLBI観測

- ・別のパルサーの紛れ込みを避けるためVLBIで
- ・系内：Cas AやHB9を搜索、パルサー星雲候補の観測
- ・系外：数10個から100個の年齢0(100)年超新星残骸
 - ✓ M81のSN1993J($d=3.7\text{ Mpc}$)は軽量星の爆発→パルス見える？
 - ✓ 10年で~4 mas ($v=10^4\text{ km/s}$, $d=5\text{ Mpc}$) の膨張運動も撮像可 → 他波長では実現できない分解能の力



SN1987A with ALMA (Cigan+2019).
周期的変動天体は見つかっていない



SN1993J with VLBA (Bietenholz+2003).
爆発後9年が経過している。

2. 学術的な問い合わせ(3/3)

中性子星はどのように電波放射するのか？

■事実：RPP, HBP, MAGの放射の類似性と相違

- 定常パルス, 巨大パルス, アウトバーストはコヒーレント放射 (輝度 $T >> 10^{12}$ K)
- MAGは平時は電波静穏。アウトバースト時に一部の場合にだけ電波も伴う

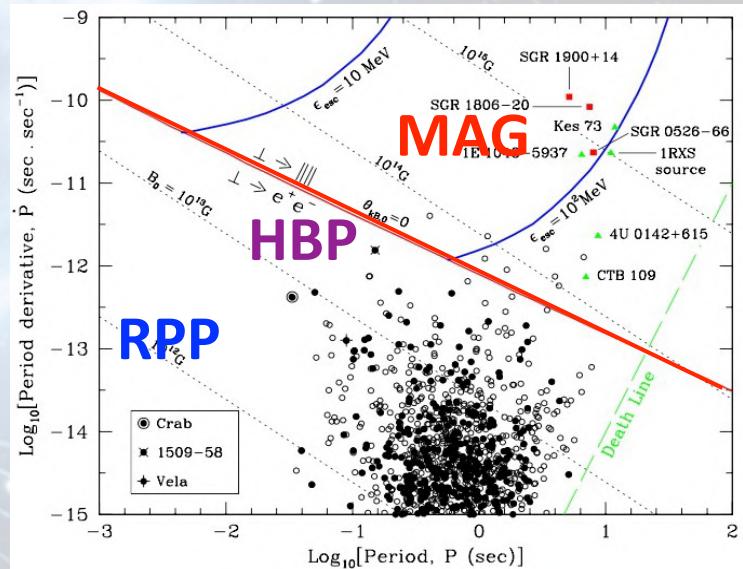
■課題：定常パルス、巨大パルス、アウトバーストの放射機構は何か

- マグネター：QED下の光子分裂が陽子・陽電子対生成力スケードを阻害?
 - もし境界が明確になればこの説を支持。境界のアノマリー → QEDを超えた現象に示唆
 - 星周ガスによる散乱や、ビームされて観測者を向いていない可能性も(c.f. FRB)

■解決策：境界天体の広帯域スペクトル、

パルス形状、短期・長期的時間変化

- コヒーレント放射は狭帯域&その場加速
 - スペクトルは放射伝搬領域の物理構造伝える
 - 短期変動=表面付近の局所的変動
 - 長期変動=大局的磁場の変動(グリッジと連動?)
- 自転に伴う偏波角の動き
 - アクションの発現(後述)



P-P*図における磁気的光子分裂と対生成の境界(Baring+08)。赤線より上では磁気的光子分裂優勢。

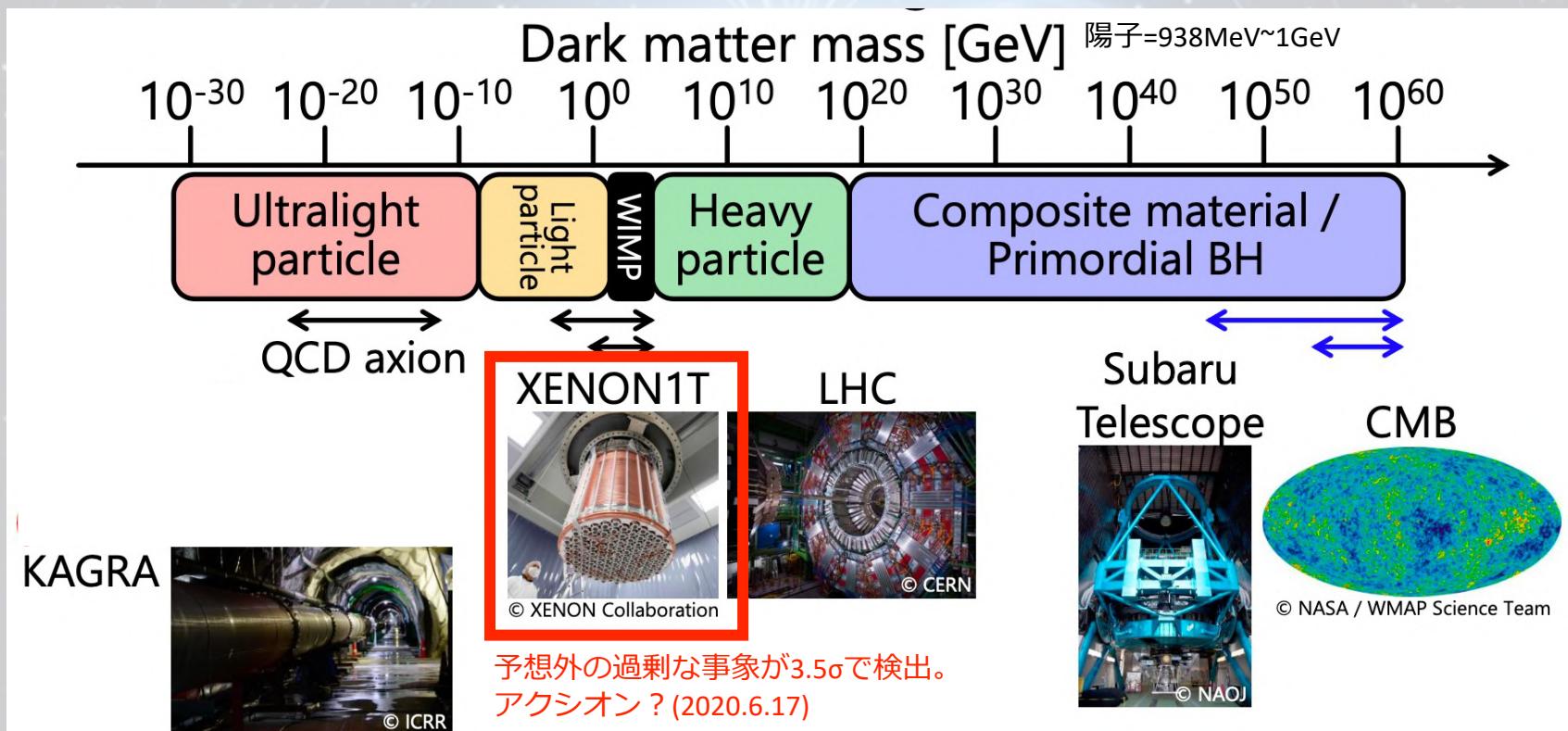


アクション ダークマター探し

まだ勉強段階なので稚拙な部分はご容赦ください

ダークマターとは何か？

- ・ダークマターの正体は全く分かっていないが、宇宙の構造形成を支配していることは確かである
- ・様々な質量(エネルギー)レンジで搜索が行われている



Oshima-san's talk on Kashiwa DM Sympo 2020

強いCP問題を解決するアクション

・ 強いCP問題

- ・ 強い相互作用(標準QCD理論)はCharge(粒子・反粒子変換)-Parity(鏡像変換)変換の対称性を破る形式
- ・ 結果、中性子に電気双極子があってもよいが、素粒子実験はこれを強く否定している → CPが~~が~~破れていない

・ ペッチャイ・クイン理論

- ・ 標準モデルにあらかじめ付加的な大局的カイラル $U_{PQ}(1)$ 対称性を入れておき、それが自発的に破れることでCP対称性を保つ
- ・ 自発的に破れた南部-ゴールドストンボソンをアクションと呼ぶ

・ 具体的にどう $U_{PQ}(1)$ を破つたらよい？

- ・ 詳しくは小玉英雄さんのレクチャーノート



アクション宇宙物理

・ アクションが見つかった！？

- ・ 2020年6月にイタリアで行われていた日本の研究機関も参加するXENON1T実験において、予想外の過剰な事象が 3.5σ (99.98%)の有意性で検出された
- ・ アクションが関与している可能性が発表され注目を集めた
 - ・ トリチウム崩壊による電子やニュートリノの可能性も残る

アクション探し：プリマコフ効果

・アクションと光子の相互作用

- 変換相互作用を考えてもよいだろう

$$L_{\text{int}} = \frac{1}{4} g \tilde{F}^{\mu\nu} F_{\mu\nu} a = g \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} a$$

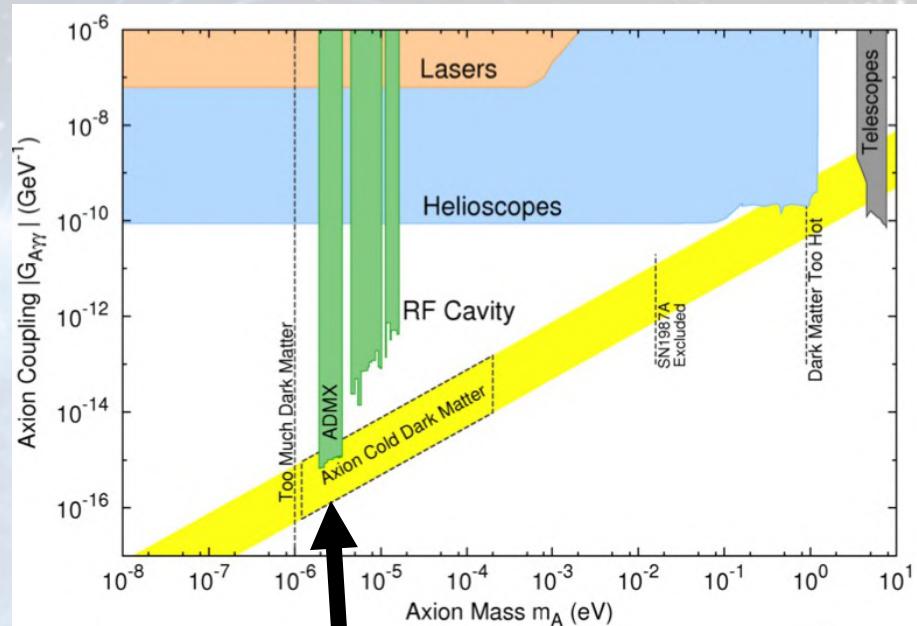
- G は結合定数、 a がアクション場、 E と B が周りの電磁場。 G はQCD理論ではアクション質量に比例。独立になる理論もある

・プリマコフ効果 = 光子→アクション

- 中性子星磁気圏では強い電場と磁場が並行に存在する状況ある。ならば $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ に比例してアクションが生成され、逃げ出し、結果電磁場エネルギーが引き抜かれるかも？
- 中性子星内部でニュートリノ冷却(URCA過程)よりもアクション冷却が効くと主張している研究もある(Maruyama et al. 2018)

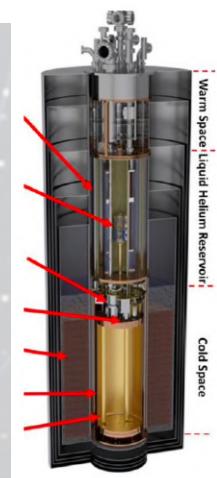
・逆プリマコフ効果 = アクション→光子

- Haloscope: 磁場を印加した装置を作って、アクションが光子に変わるのが見つける
- 中性子星磁気圏ではアクションが効率よく光子に変換・特性輝線が出ているかも？



ダークマーターハローからのアクション探し

$5 \mu\text{eV} \rightarrow h\nu = mc^2$, $f = m/2\pi \sim 1 \text{ GHz}$ の電波放射になる



アクション探し：輝線の探査

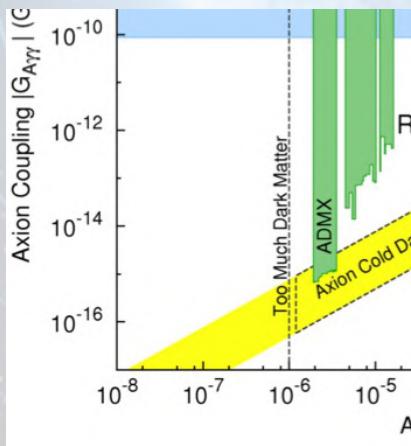
・観測

- GBTとEffelsbergでプリマコフ効果があり
そうなマグネター&銀中を観測

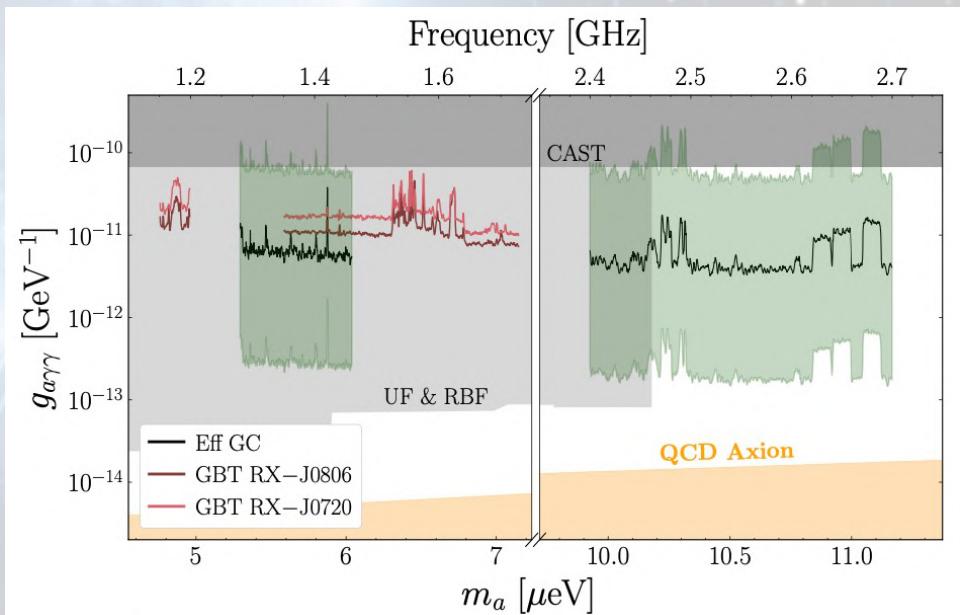
・結果

- 非検出。質量5-11 μeVのレンジで結合定数に独立した制限を得た
- 輝線なのでかなり感度が必要

赤と紫がGBTのRXJ天体、黒がEffelsbergの銀中。銀中はDMモデルで制限域が代わるので緑でその範囲が示してある。



GBT=20分x2天体, L(1.15-1.73) GHz
Eff. = 61.9分L(1.28-1.46) GHz
40.0分S(2.4-2.7) GHz



アクション探し：複屈折

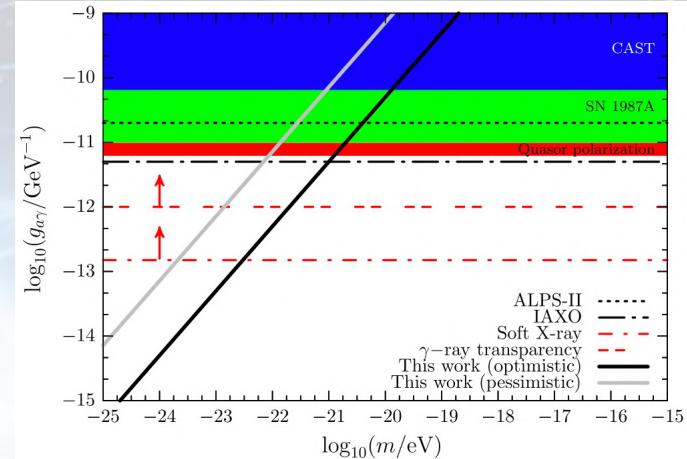
・複屈折(Birefringence)

- 光が特殊な結晶などに入射すると光の偏光方向によって屈折率に異方性を持つ現象
- 屈折率は水平と垂直の偏波の光速度を変える→偏波角あるいはパルスの到来時刻に系統的ズレが生まれる
- 真空も強磁場によって仮想粒子があれば複屈折性を持つ(真空複屈折)。仮想電子対とアクションとでは複屈折に違い見られるはず
 - 電磁場光子のエネルギー $\omega(\hbar=1)$ 、光子の電場面(偏波面)の方向の磁場 $B_{||}$ として、光子-アクション混合状態の固有値は $m_{\pm}^2 = \pm g B_{||} \omega$ 、実行的な屈折率が $n_{\pm} = 1 - m_{\pm}^2 / 2\omega^2$ と予想される

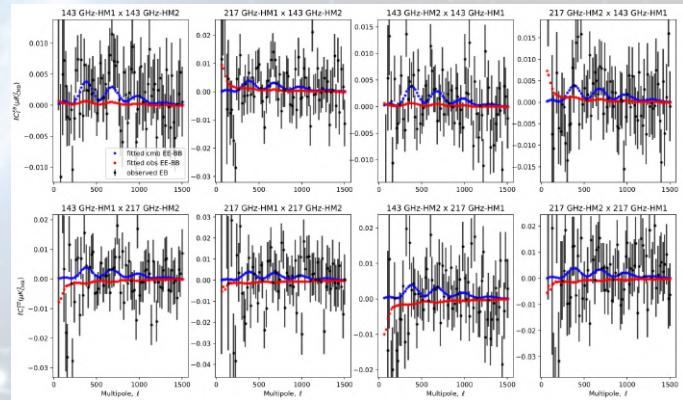
・アクションダークマター

- 強磁場でなくてもアクションが満ちていれば、直線偏波面が「時間的に」回転する
- ALMA: 原始惑星系円盤偏光からの制限
- Plank: CMB偏光からの制限 $\beta = 0.35 \pm 0.14$

$$\tilde{\beta} = \frac{1}{2} g_{\phi\gamma} \int_{t_{\text{LSS}}}^{t_0} dt \dot{\phi}$$



Fujita et al. 2019, PRL, 122, 191101



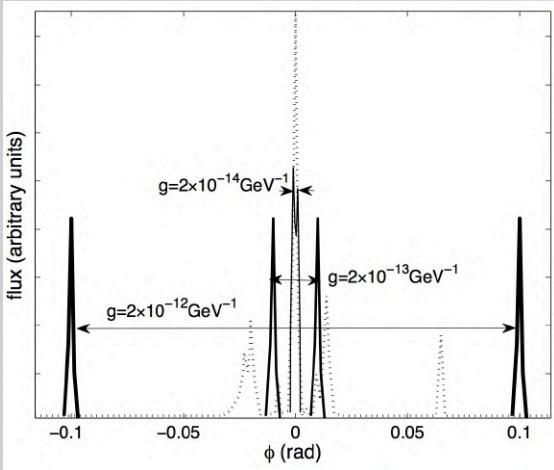
Minami & Komatsu 2020,
arXiv:2011.11254

アクション探し：偏波

- 典型的なパルス位相のズレは

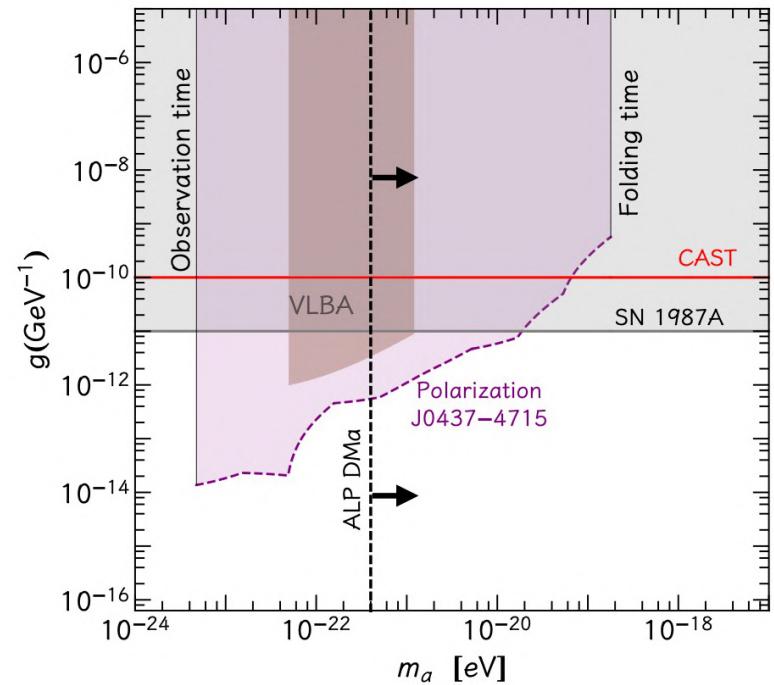
$$\delta\phi \sim 1 \left(\frac{g}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right) \left(\frac{B}{10^{15} \text{ G}} \right) \left(\frac{\omega}{2 \text{ GHz}} \right)^{-1} \text{ rad}$$

- と予測される(Guendelman & Chelouche arXiv:1202.0151)



アクション場が存在する場合のXTE J1810-197の2006年の電波アウトバーストに対する、周波数 300 MHz、磁場強度 $B_{||}=10^{16}$ Gを仮定した場合のパルス位相のズレの理論計算

- PSR J0437-4715の1609日間・393点の偏波角の数度の分散から、 $g \leq 10^{-12} \text{ GeV}^{-1}$ ($m_a / 10^{-21} \text{ eV}$)の制限が付いている(Caputo et al. 2019)。



Caputo et al. 2019, arXiv: 1902.02695

FIG. 2. Constraints for ALP DMa in the plane $g - m_a$ at 95% CL. The dash-dotted purple line indicates the lower bound set by polarization measurements using real data. The darker gray band indicates the region excluded by CAST experiment [31] and by supernova cooling [46], while the amaranth pink area indicates the region excluded by MOJAVE VLBA polarization observations of parsec-scale jets from active galaxies [47]. The vertical dashed line represents an estimation of the masses for which the ALP DMa candidate can constitute all the ρ_{dm} [48–50].

まとめ

- ・国内VLBI観測の将来計画を考える機会があった
- ・中性子星のVLBI観測をVERA望遠鏡の将来計画として提案した
 - ・中性子星の誕生と進化の謎 → VLBIによる位置速度決定
 - ・若い中性子星の性質の謎 → VLBIによる探査
 - ・中性子星の電波放射の謎 → 広帯域スペクトル、偏波、時間変化
- ・中性子星の電波観測からアクションの検索ができるかも
 - ・輝線の観測・偏波の観測
 - ・まだ世界最高レベルにまでは至っていないが、独立した制限として結果が得られつつある
 - ・「プリマコフ効果」が磁場に関わることから、宇宙最強磁場を持つ中性子星は重要なターゲットとなっていくと考えられる