

# VLBI将来計画WG

## 極限天体班 現状報告

VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化（仮）

メンバー：

赤堀卓也（NAOJ）、Eie Sujin（東大/NAOJ）、  
新沼浩太郎（山口大学/班長）、藤澤健太（山口大学）

2020年9月23日 VLBI将来計画WG 中間まとめ報告会

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*



# 目次

- ◎ 目標・活動履歴
- ◎ 背景：学術的な問い
- ◎ 提案する研究
  - 特徴、日本の独自性・優位性
- ◎ 要求性能・システム
- ◎ 計画

# 目標・活動履歴（2020年4月～）

## ◎サイエンスを基軸に検討

- 極限天体に関する埋もれているテーマ、新規かつ未着手あるいは準備中のテーマ、VLBIが（も）重要な手法になりうるテーマ

## ◎検討スケジュール

- 第1回（4月9日）：トピック洗い出し、検討方針の確認、今後の予定
- 第2回（4月30日）：パルサーアストロメトリについて（他と比較、精度、重要性）
- 第3回（5月21日）：SNR-NS対応、系内BH、系内コンパクト天体、系外超新星
- 第4回（6月18日）：可視赤外の立場から系外SNeのレビュー（ゲスト）、中性子星の研究
- 第5回（7月8日）：中性子星の研究（中性子星の誕生・進化・放射機構）
- 第6回（7月29日）：極限天体の誕生（系外超新星、系外パルサー、系内外孤立形BH）
- 第7回（8月20日）：系内BH（、サマリー文書）
- 第8回（9月16日）：提案整理（、サマリー文書）

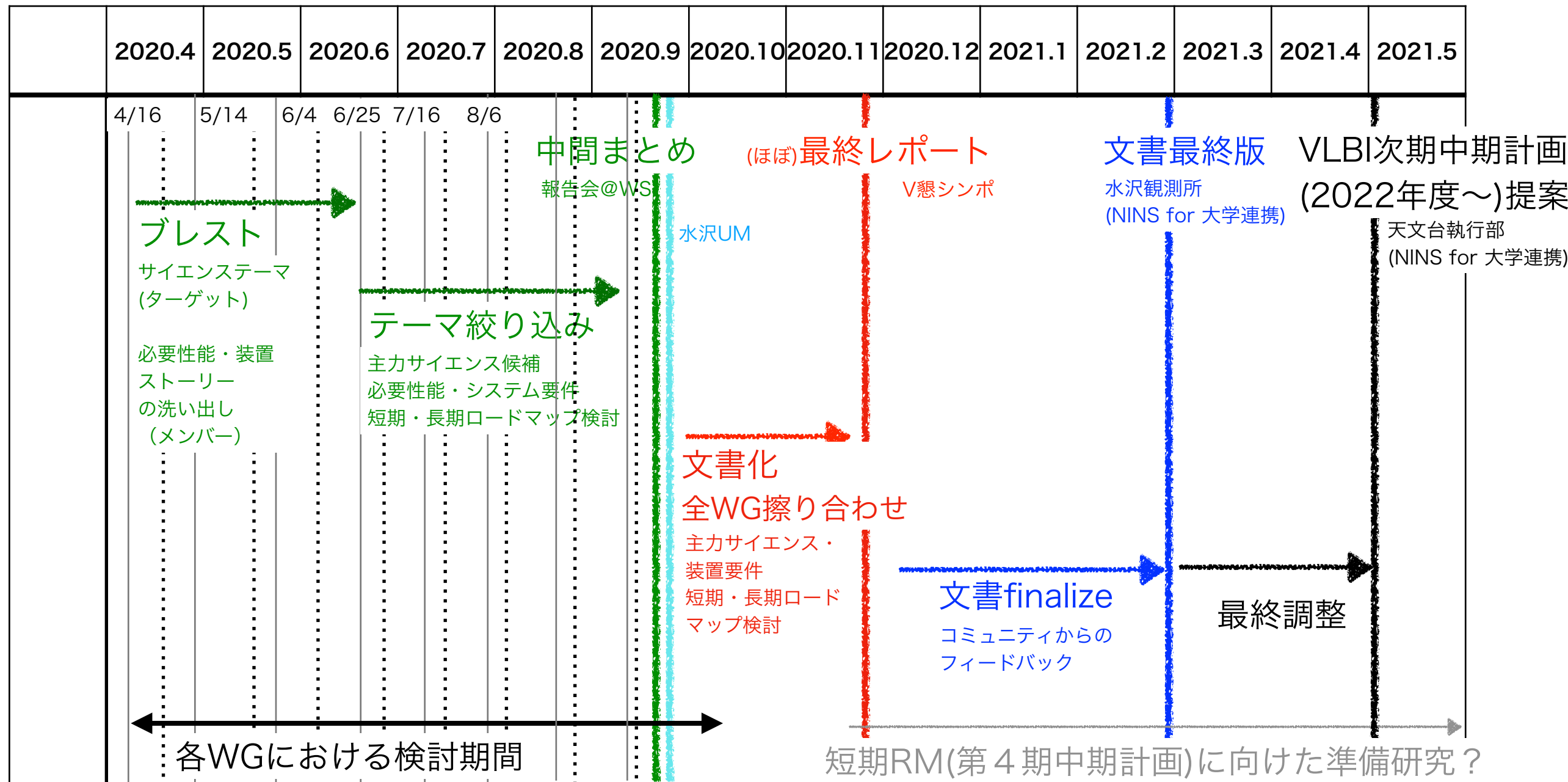
緑：ブレストーミング期、青：提案期、黒：集約期

# 目標・活動履歴 (2020年4月～)

## 検討スケジュール

.....全体M (日付)

———極限天体M



# 目標・活動履歴（2020年4月～）

## 検討方針の共有

### ◎タイムライン

- 短期的将来計画（2022年から6年程度: 4 期中期計画）
- 長期的将来計画（4 期中期計画以降、15-20年先を見据えて）
- 2021年度は移行期間という考え（準備研究を進めていく）

### ◎境界条件：科学的テーマを基軸に要求性能・必要装置を検討

- 既存のアレイ（VERA/JVN/EAVN/VLBA/EVN/ALMA）、既存アレイのアップグレード（u-EAVN, GVA）、将来の大型装置（SKA1/ngVLA など）、新しい観測装置
- マイテレスコープ（拡大解釈あり）を基軸にした検討もありうる
  - ・ 本WGの特性上、この検討方針もあり得る

# 活動履歴（2020年4月～）

## ブレーストーミング

### ◎系内BH探査

- host-SNeの関係→アストロメトリ

### ◎パルサー/マグネター

- パルサー
  - ・ レガシーという観点（10-20年間パルサーアストロメトリ→速度の決定精度を1桁あげたら何がわかる？SKAではひたすらモニターは難しい？→相補的になるのでは、host-SNeがわかる？）
  - ・ パルサー前のSNeが連星の片割れ
  - ・ パルサーの進化？予想以上に長寿命なやつ、10秒以上の周期（X線ではもっと長い→RRATs?）
- マグネター
  - ・ Hostを考える際に、パルサーのケースとの比較は重要（中性子星の状態方程式につながる？）

### ◎超新星爆発、GRBs

◎MM（ $\nu$ : blazar, GW:NS-NS）、タイムドメイン（SNe, BH関連）、FRB（感度or視野）

◎Sgr A\*アストロメトリ → 銀河班が検討

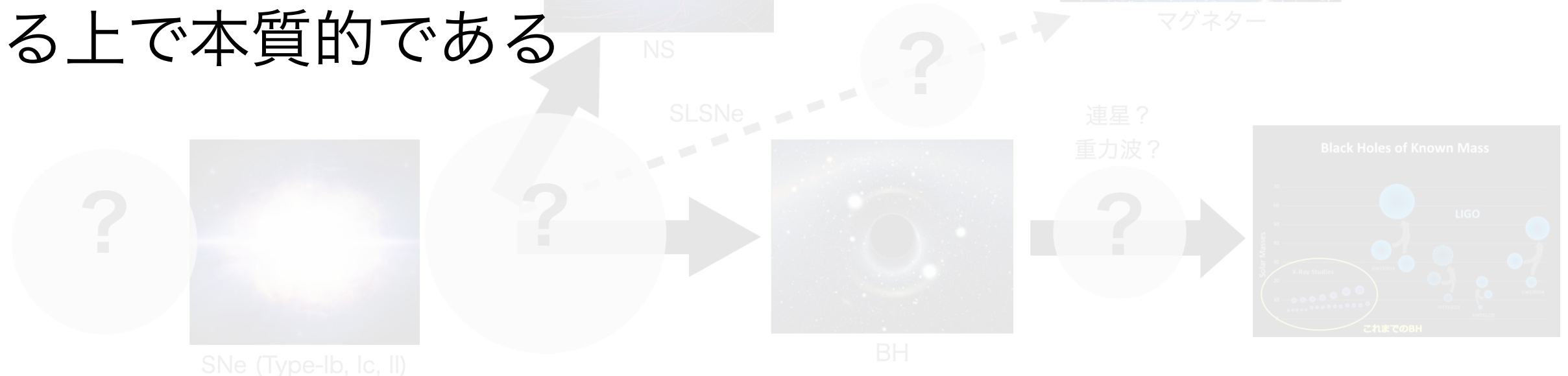
キーワード：アストロメトリ、低周波（ $\lambda > 1\text{cm}$ ）、高感度、時間領域

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

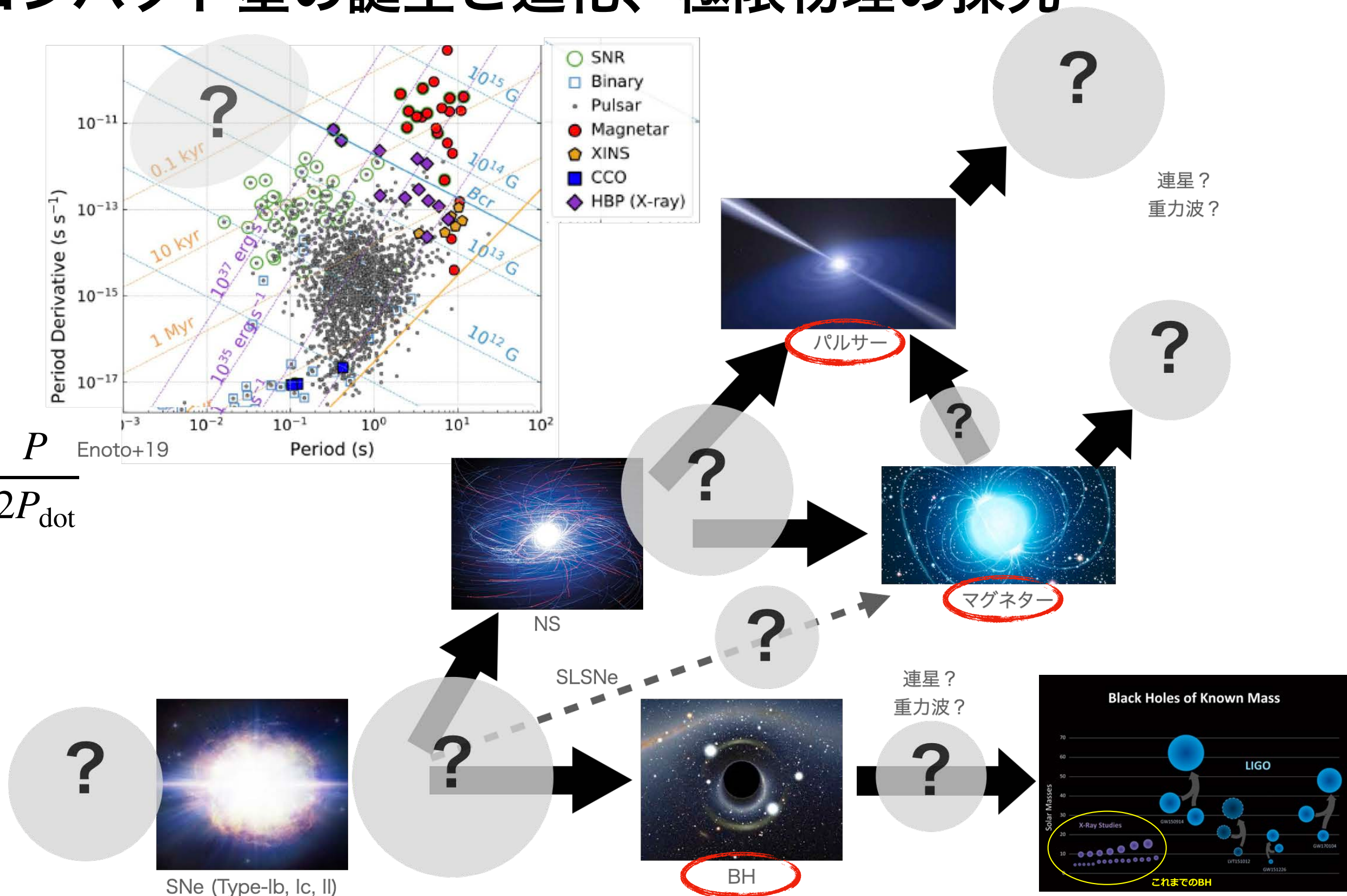
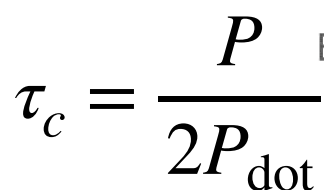
## 背景：学術的な問い

- ◎大質量星の終焉である超新星爆発とともに、コンパクト星がどのように誕生し、そして進化していくのか？
- ◎コンパクト星において観測される、地上では達成できない極限環境下の物理はどのように実現されるのか？

を明らかにすることは宇宙における物質の起源を理解する上で本質的である



# コンパクト星の誕生と進化、極限物理の探究



# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 重要な科学研究

### 1. 中性子星の誕生と進化の探究

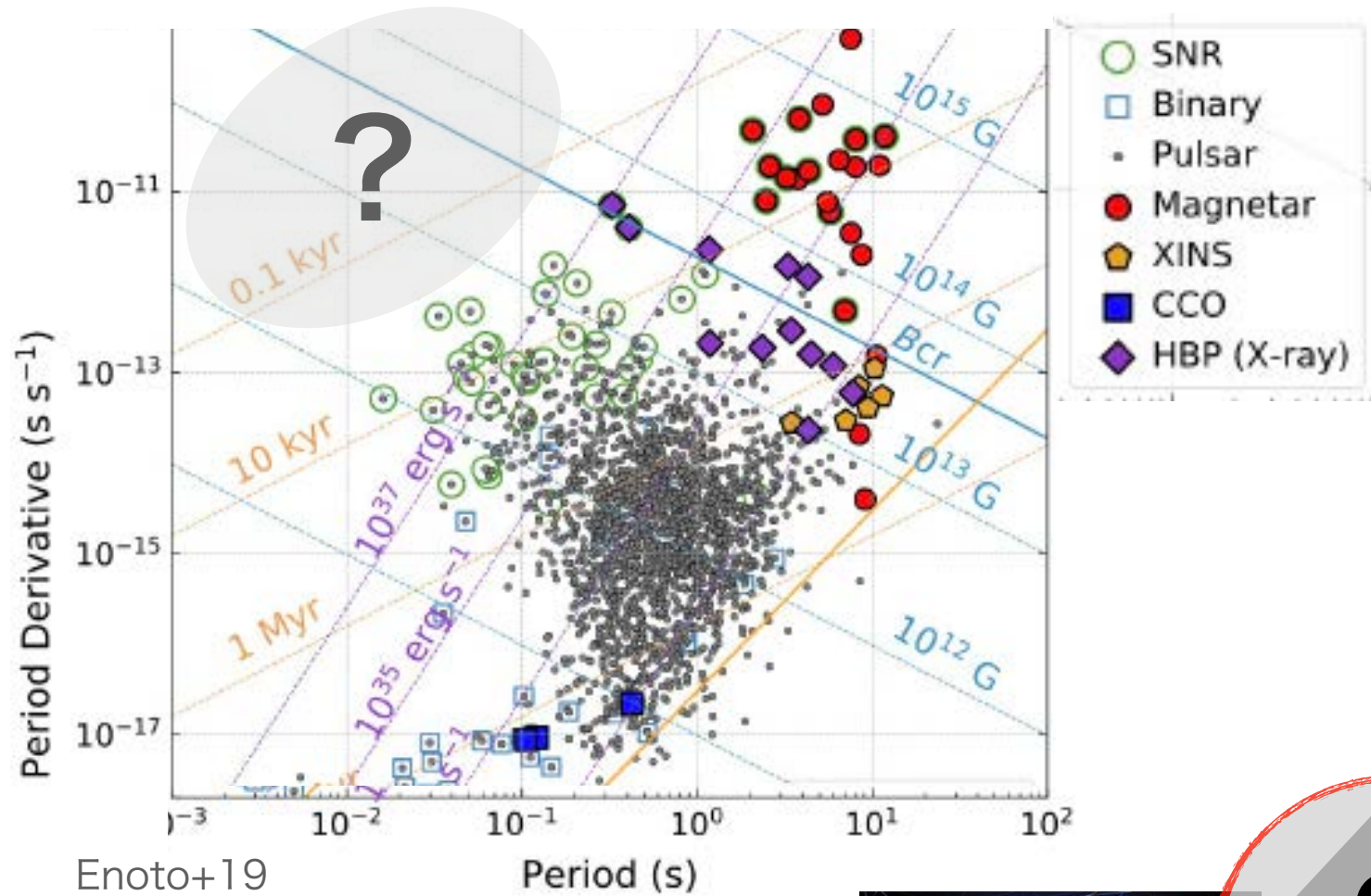
- 自転周期変化率の大きい中性子星のVLBI位置天文観測
- 広帯域電波パルス観測による中性子星の進化と電波放射機構の関係

### 2. 若い中性子星の探査と放射機構の理解

- 系外超新星観測による若い中性子星の探査

### 3. 系内ブラックホールの起源と放射機構の探究

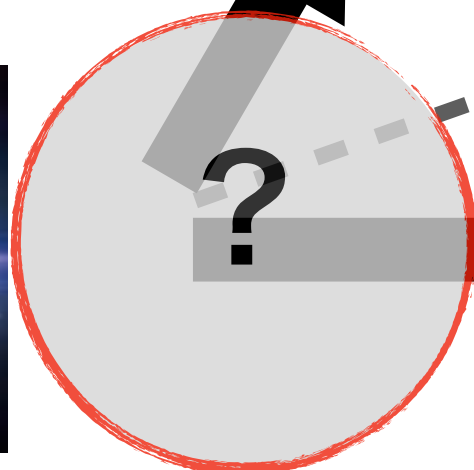
- VLBI位置天文観測による系内BH形成過程の探究
- 高空間・時間分解能観測によるBH連星のジェット形成・放射機構の研究



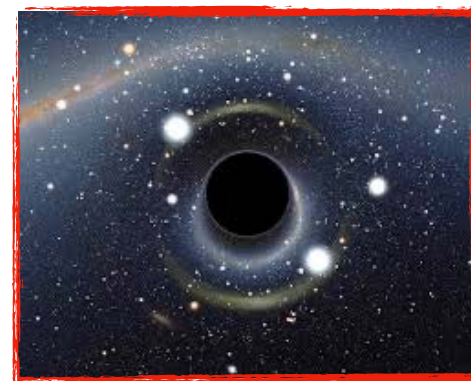
赤枠：本研究によるブレーク  
スルーが期待される



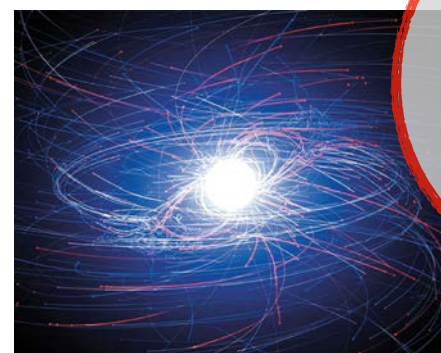
SNe (Type-Ib, Ic, II)



SLSNe



BH



NS



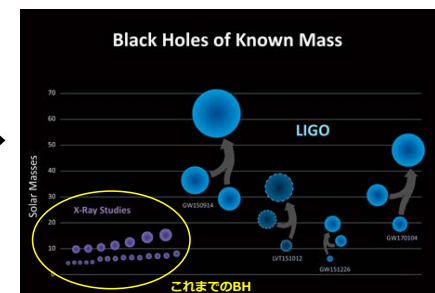
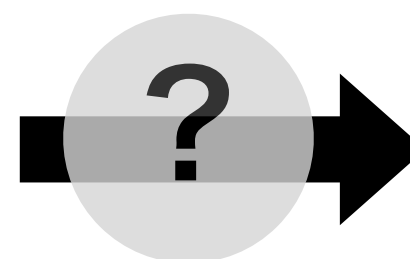
パルサー



マグネター



連星？  
重力波？



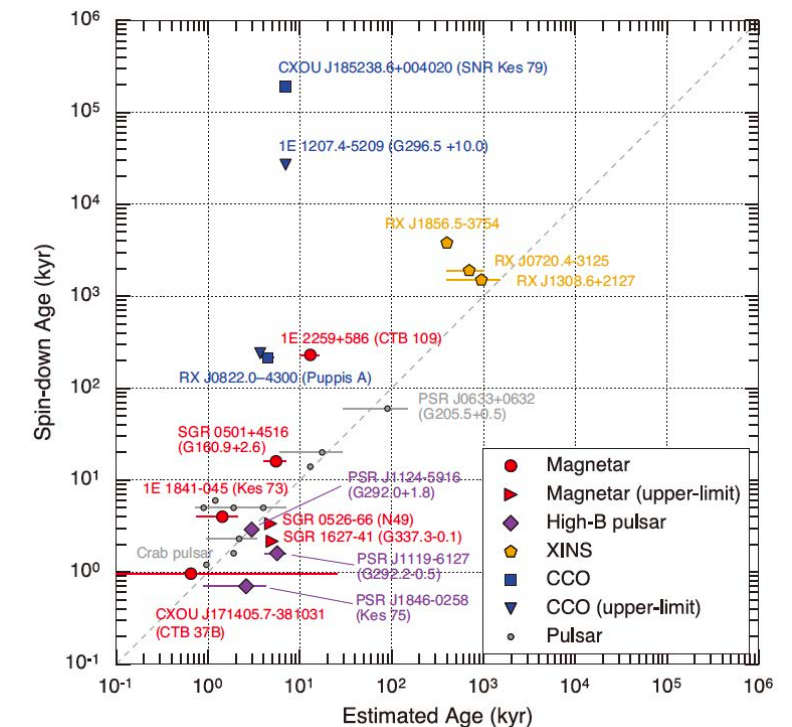
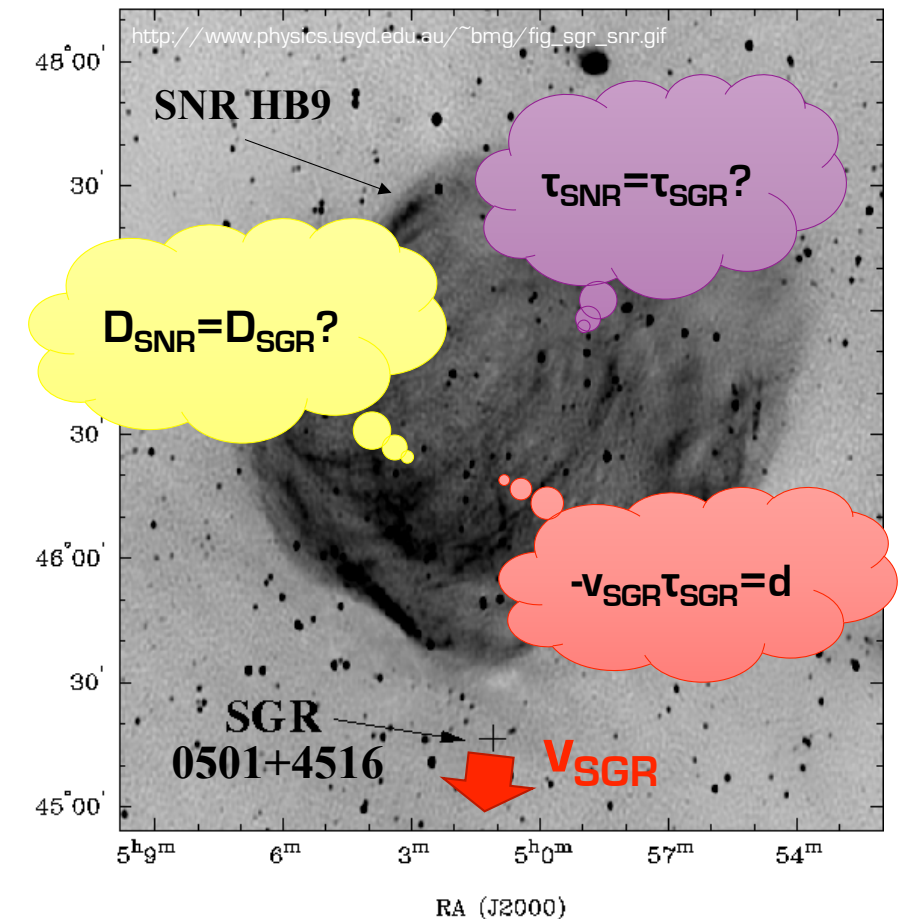
連星？  
重力波？



# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 1. 中性子星の誕生と進化の探究

- ◎ 自転周期変化率の大きい（若いと予想される）中性子星のVLBI位置天文観測
  - 超新星爆発によって運動エネルギーを獲得し高速運動
    - ・ 星間ガスによる減速の効果は弱い
    - ・ 3次元的位置・速度、（推定）年齢から誕生現場を同定
  - 中性子星と親超新星爆発（残骸, SNR）の紐付けによる中性子星の真の年齢を推定（右下図）
    - ・ 特性年齢とSNRの年齢の比較
    - ・ 強磁場パルサーやマグネターでは両者に大きな差➡ 進化の過程で分化？ 生まれながらに異なる種族？
  - P, P\_dotの計測、位置天文観測でのSNRの割り出し or SNR内における誕生位置の特定 → 年齢推定精度の向上 → P-P\_dot上での進化を理解



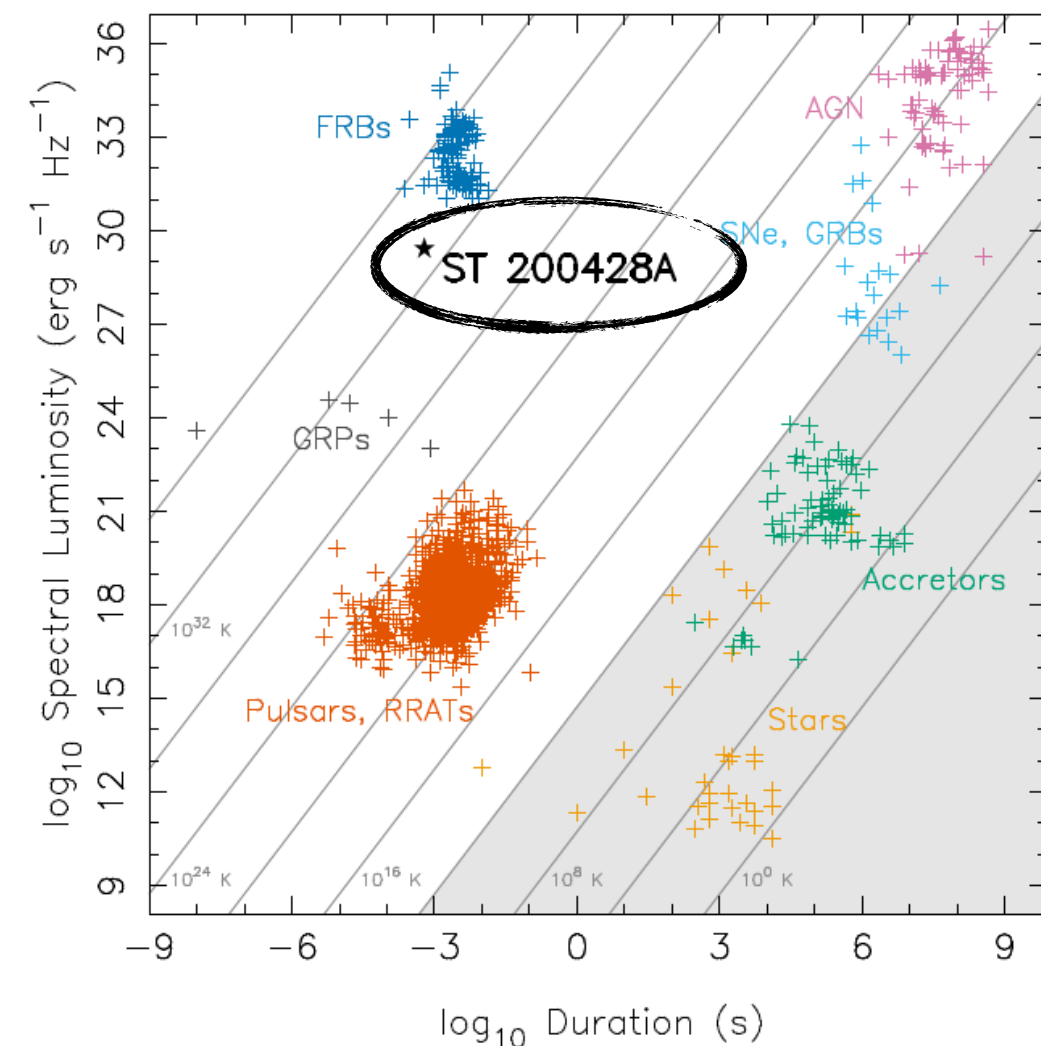
特性年齢（縦軸）と超新星残骸の推定年齢（横軸）の関係  
赤いプロットはマグネター（Enoto+19）

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 1. 中性子星の誕生と進化の探究

### ◎ 広帯域電波パルス観測による中性子星の進化と電波放射機構の関係

- 比較的若い中性子星とされているマグネターや強磁場パルサーの突発的なパルスの強度頻度は、通常パルサーのものと振る舞いが異なる
- 狭いスペクトル領域の指数のみでなく、**連続的な広いスペクトル**でのパルス観測が重要
  - ・ 頻度分布の周波数依存性の有無
  - ・ 最高エネルギーパルスの見極め（FRBとの関係性を理解するうえでも重要）



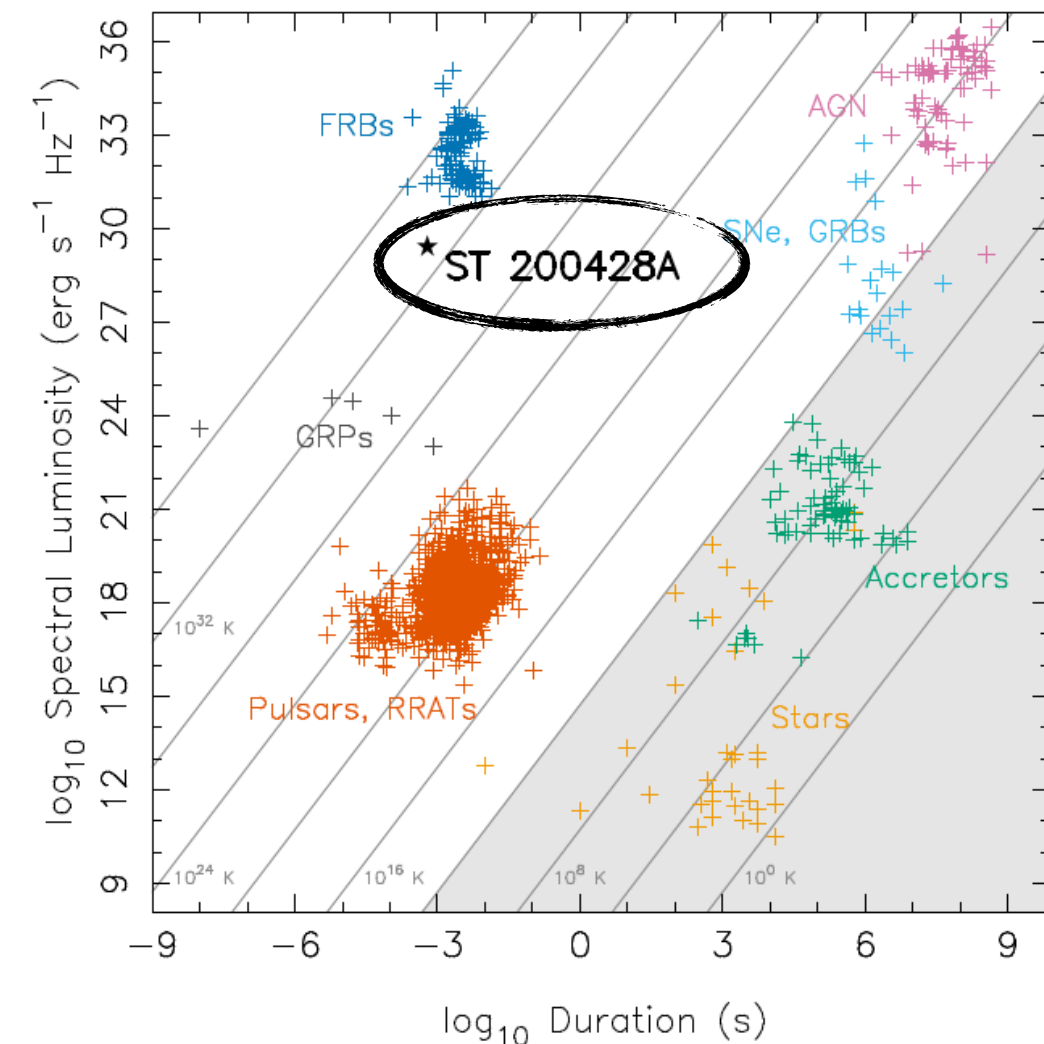
1.5MJy ms@1.4GHzでの検出報告がされた  
SGR1935+2154のphase-space上のプロット (Bochenek+20, arXiv)

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 1. 中性子星の誕生と進化の探究

### ◎方針

- 自転周期変化率の大きい ( $>10^{-13}$  s/s) 中性子星を対象
  - ・ 10個の通常パルサー、10個の強磁場パルサー、10個のマグネター（年1個出現で10年計算）
  - ・ 若い中性子星候補の種族をカバーし、 $\mu$ ,  $\pi$ , P, P\_dot を網羅した初めてのカタログ作成
    - ・ Parkesは>2000天体以上のパルサーカタログ (P, P\_dot)、VLBA PSRPIは60の通常パルサーと42のミリ秒パルサーのみ ( $\mu$ ,  $\pi$ )
- 既存のSNRカタログの情報との紐付け
- 広帯域スペクトルの取得と時間変化の調査から各種族の差異を明らかにする



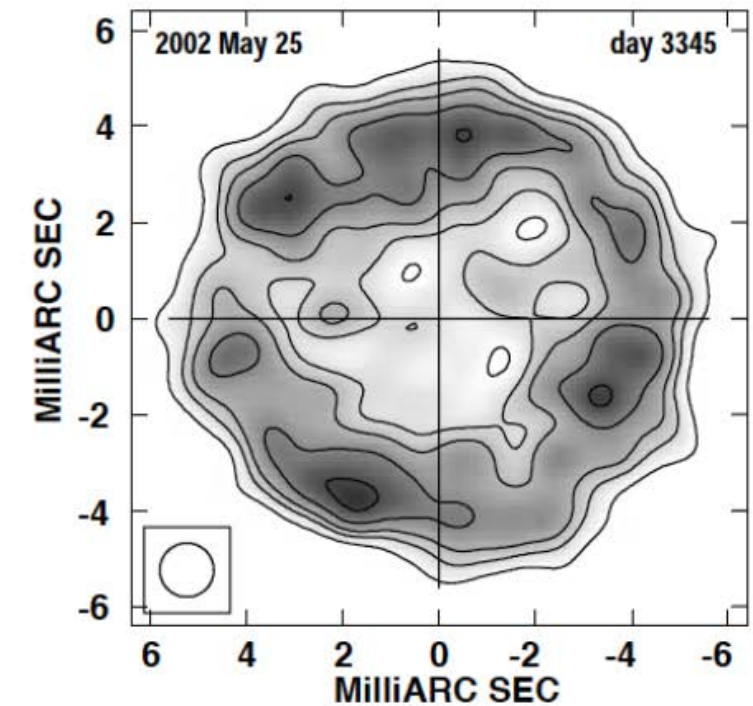
1.5MJy ms@1.4GHzでの検出報告がされた  
SGR1935+2154のphase-space上のプロット (Bochenek+20, arXiv)

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

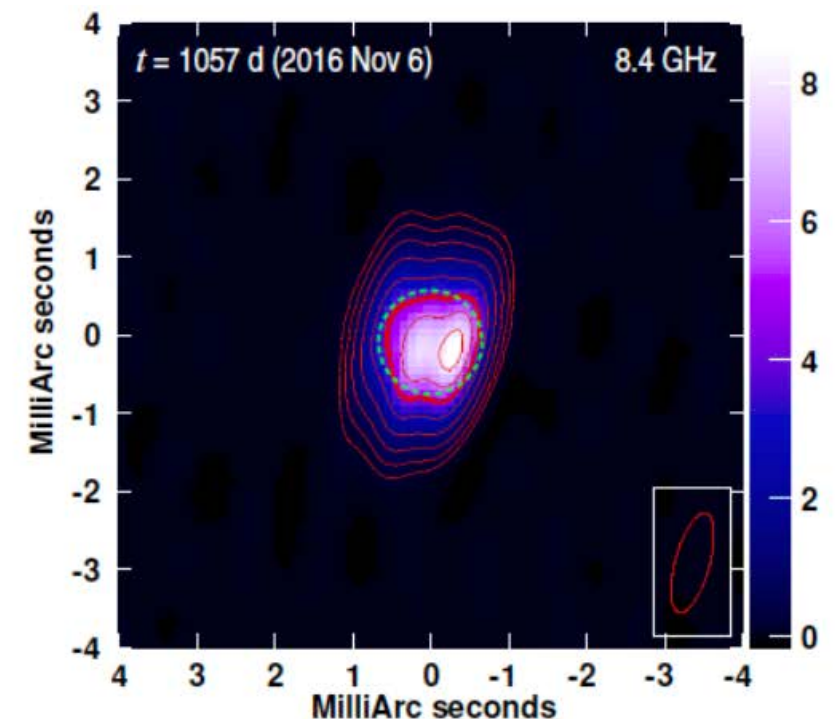
## 2. 若い中性子星の探査と放射機構の理解

### ◎系外超新星観測による若い中性子星の探査

- 特性年齢 $< 100$ 年の領域は空白＝**生まれたばかりの中性子星を観測した例が無い**
    - ・ 誕生したばかりの中性子星の性質を理解すること (e.g., マグネターがマグネターとして誕生するのか否か) は、その進化の理解のためには本質的
  - 若い中性子星を探し出すことが直接的
    - ・ 自転周期変化率の大きい中性子星の積極的な研究
    - ・ 若い超新星爆発（残骸）における中性子星の検出
  - 系外超新星
    - ・ 20Mpc以内なら100年以内に100個程度
    - ・ SN1987Aの内部に中性子星が存在する可能性の報告 (Cigan+19)
- ➡本当であれば30歳の中性子星！



SN1993JのCSMとの相互作用の様子 (Bietenholz+03)



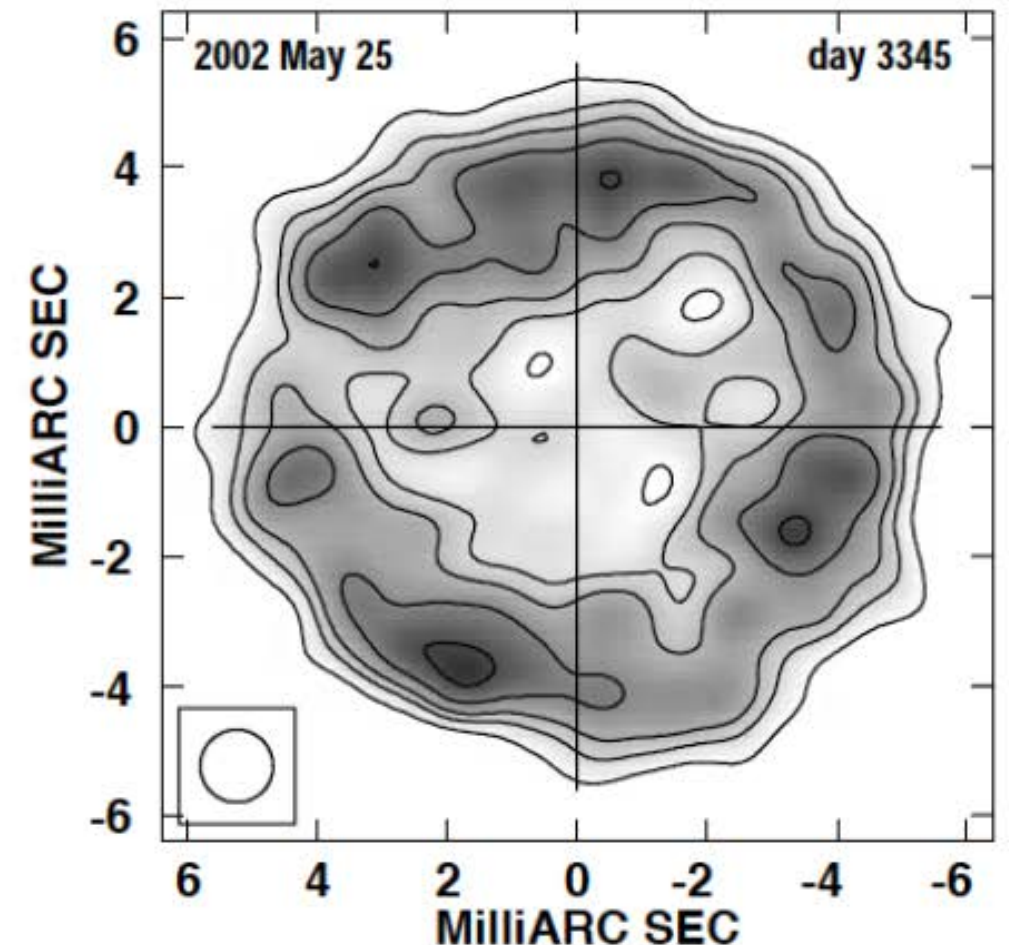
SN2014CのCSMとの相互作用の様子 (Bietenholz+18)

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 2. 若い中性子星の探査と放射機構の理解

### ◎方針

- 若い超新星残骸は厚いガスによる吸収で電波パルスも観測できない可能性
  - ・ 低周波 (< 10GHz) では晴れるまでに >10年程度かかる可能性がある
- SN1987A/SN1993Jが筆頭候補
  - ・ 前者は晴れるまでまだ時間がかかる可能性、後者は軽めの星の爆発とされているため、晴れるのは早い可能性
- 他に良い候補を探す
  - ・ 100年以内@< 3MpcのSNRは10個程度
  - ・ VLBIイメージング (AGN放射などとの切り分け)
- 検出できるのはGRPクラスの放射 (kJy ms)
  - ・ 10年程度のモニターで上限値を与える
  - ・ 定常パルスは検出不可能 (1μJy@1Mpc)
  - ・ VLBIであれば、同一銀河内の他の中性子星の放射の可能性を棄却可能



SN1993JのCSMとの相互作用の様子 (Bietenholz+03)

$$\tau_{SSA} = \left( \frac{\nu}{5\text{GHz}} \right)^{\alpha-2.5} \left( \frac{t-t_0}{1d} \right)^{\delta''}$$

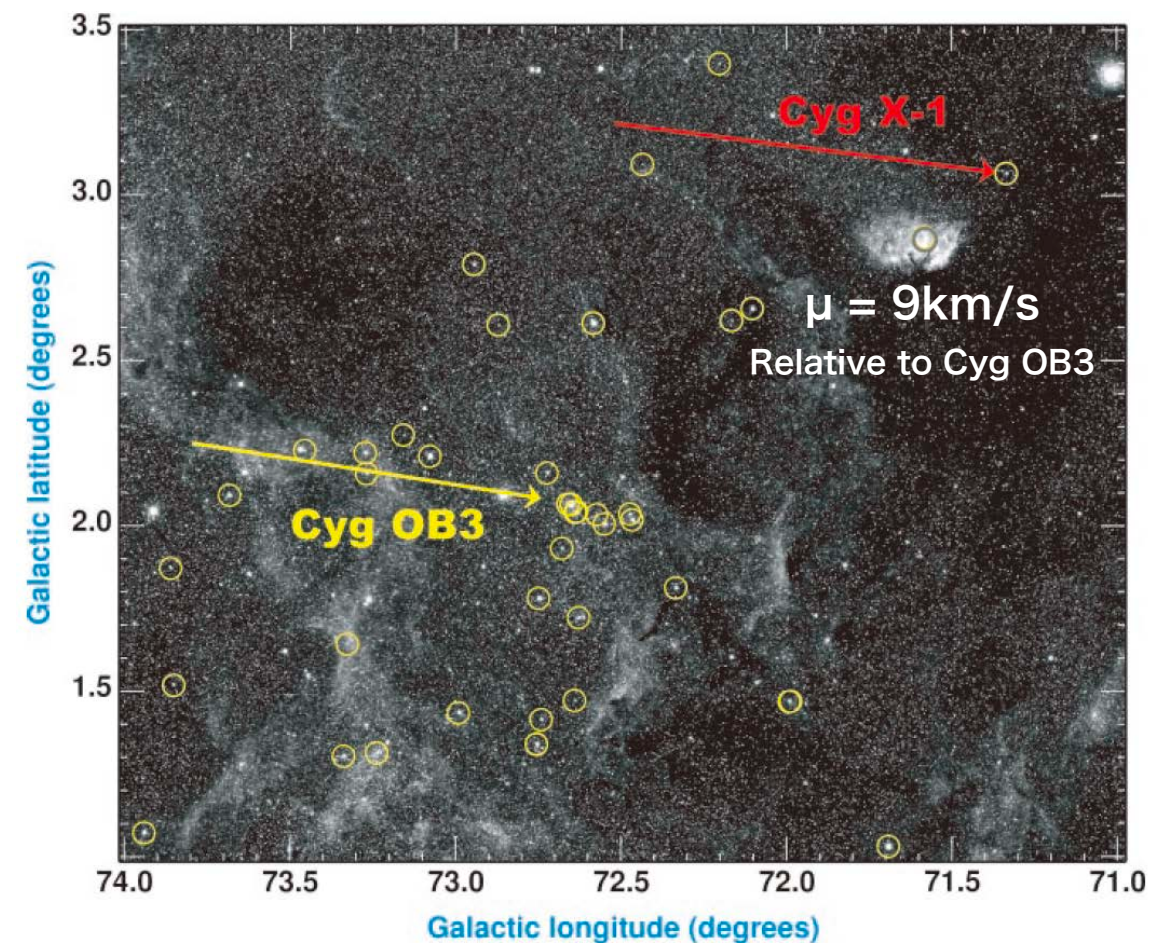
SSAを仮定した場合のオパシティの時間変化 (Anderson+17)

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 3. 系内ブラックホールの起源と放射機構の探究

### ◎ VLBI位置天文観測による形成過程の探究

- 超新星爆発により誕生するにも関わらず特異運動を示さないものがある
  - Cyg X-1の場合、伴星は大質量星（25太陽質量＝短命）であるため、BH親星も同時期に形成されたと考えられる→爆発から間も無い
  - 超新星残骸は近傍に存在しない→超新星爆発を介さず形成？
  - 大きな特異運動を示すものとSNRの関係は？
- GAIAでは銀河面を探れないため、VLBIアストロメトリが重要な手法となる



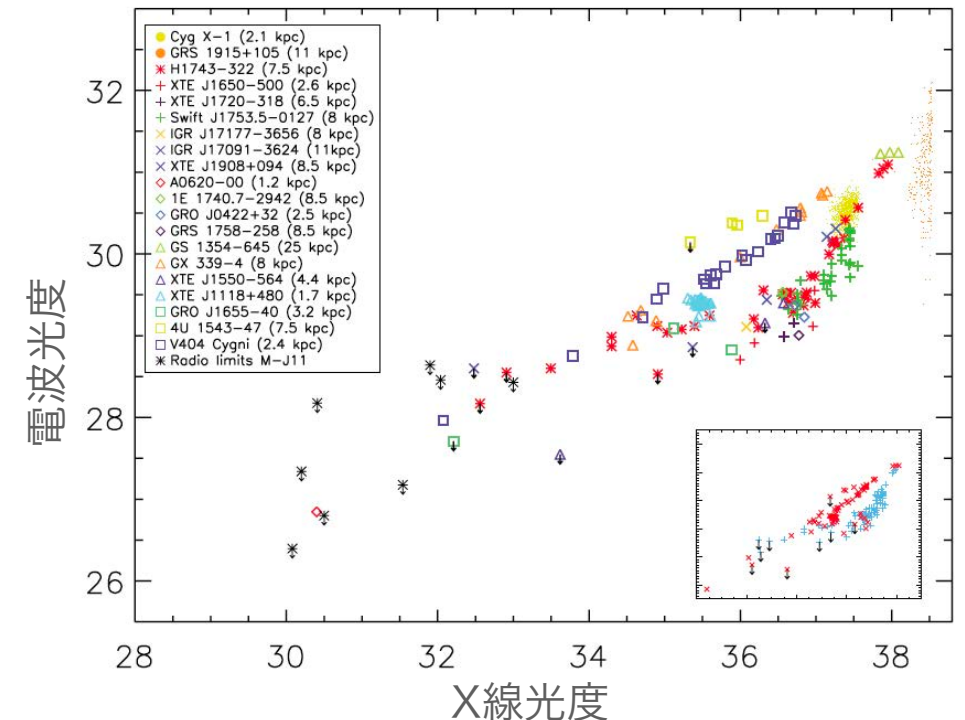
Cyg X-1の例 (Mirabel & Rodrigues 2003)

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

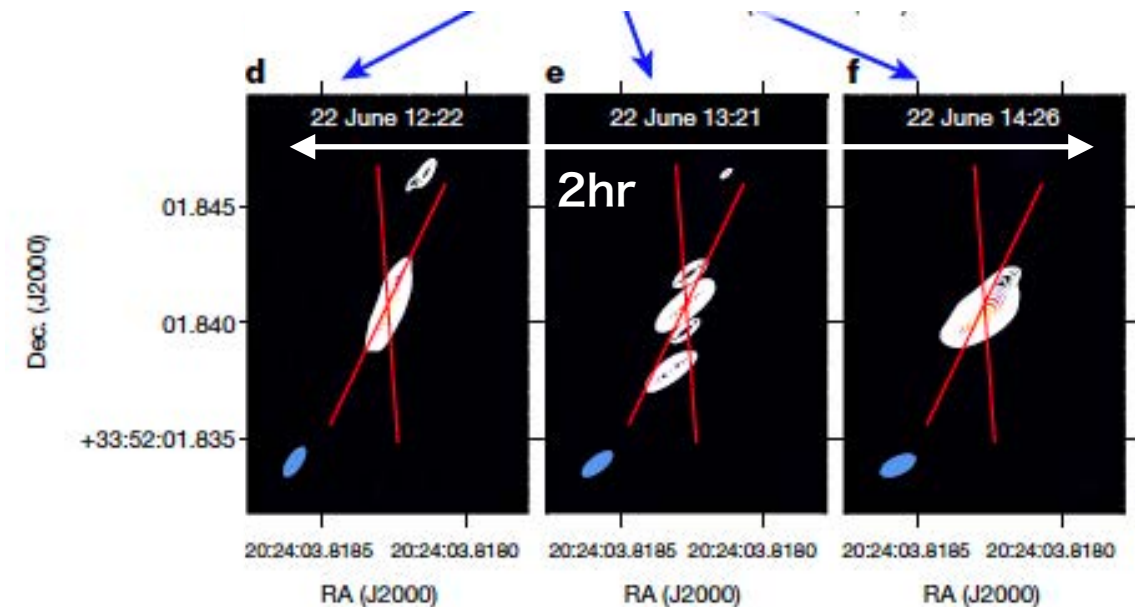
## 3. 系内ブラックホールの起源と放射機構の探究

### ◎高空間・時間分解能観測によるジェット形成・放射機構の研究

- $\mu$ クエーサーは電波・X線で多様な強度変動モードを示す (Pooley & Fender 1997) のだが、その起源は必ずしも明らかではない
- X線 (円盤放射) と電波 (ジェット) で放射領域が異なるにも関わらず、両者の光度に強い相関が見られる (e.g., Islam & Zdziarski 2018)
  - ・ ジェット放射機構・噴出機構 (Disk-Jet connection) の立場から、近いが小さい)
- 30分程度の時間分解能でのイメージングが直接的



XRBsにおける電波/X線の光度関係 (Gallo+12)



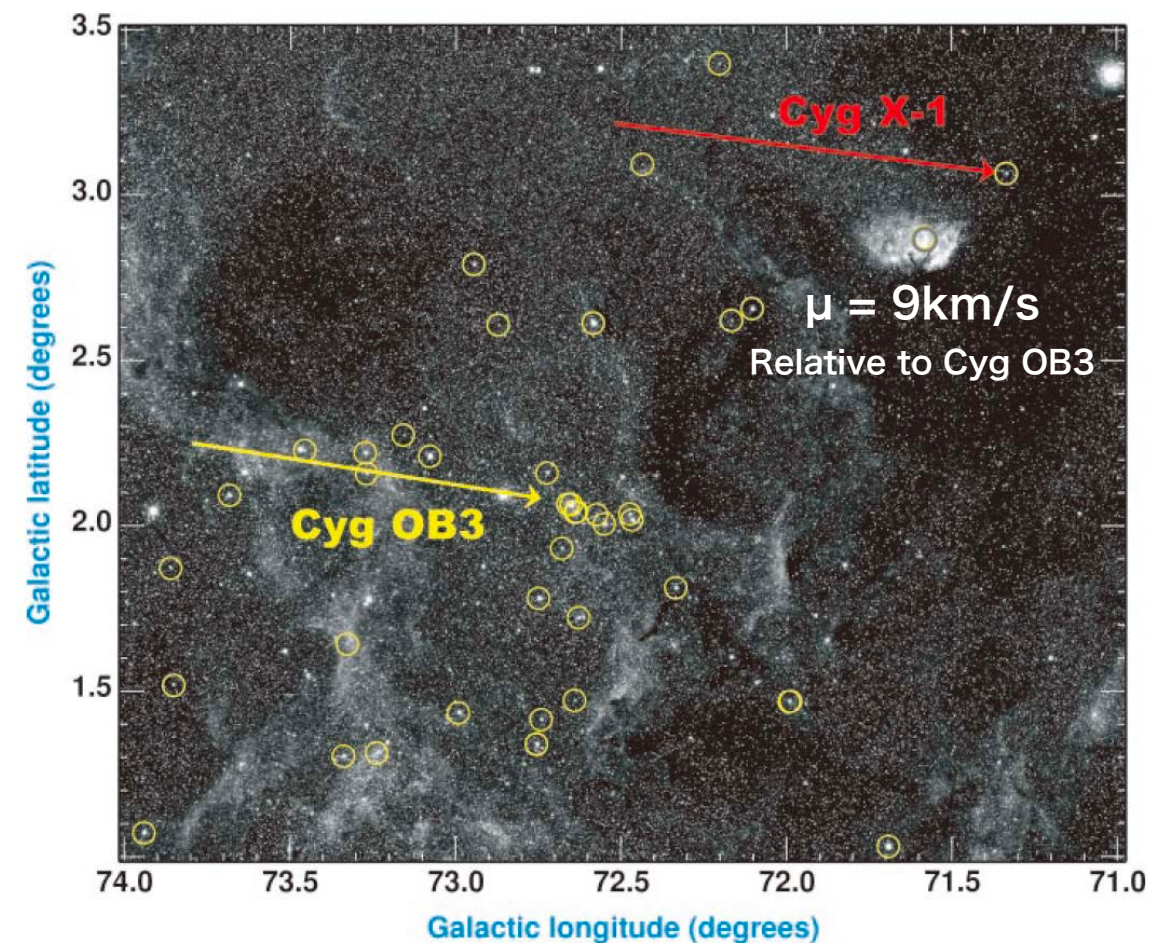
V404 Cygni with VLBA@15GHz  
(Miller-Jones+19)

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 3. 系内ブラックホールの起源と放射機構の探究

### ◎方針

- 観測対象となるのはGRS 1915+105, Cyg X-3, LS 5039など静穏期で > 数mJyのμクエーサー 5天体程度
  - ・ 将来的な感度の向上（検出感度1mJy）で10天体程度が候補になる
- 放射機構については、多波長連携でモニター観測が必要
  - ・ monthly程度の撮像モニター
  - ・ フレア時は、時間分解能を上げたイメージング
  - ・ 0.5mas程度の空間分解能が必須
- 特異運動が無い場合、4masの分解能でmonthlyモニターを5年程度継続すること制限を付けることが可能
  - ・ LS 5039, Cyg X-3なども伴星が>10太陽質量



Cyg X-1の例 (Mirabel & Rodrigues 2003)

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 新規性・学問的インパクト・周辺分野への波及

- ◎誕生間も無い中性子星の発見、大質量星を伴うX線連星においてBH誕生と超新星爆発の結びつけ、は1天体でも大発見（質的）
- ◎国内VLBI業界の研究の方向性を変える質的な転換をもたらす
  - 学術的重要性にもかかわらず、中性子星・系内ブラックホールの研究は国内VLBI・電波天文コミュニティにとって従来は主要なテーマではない（研究者はいる）
  - 日本で培ったVLBIの実績を活かした新たな学問分野の開拓という位置づけ
- ◎波及効果
  - 中性子星の位置天文
    - ・ SKA時代に生きるカタログ（パルサータイミングに基づく重力波検出には位置決定精度が影響）
  - 系内BHの研究
    - ・ 孤立形BHの観測には次世代大型電波天文観測装置の感度が必須
  - 分野横断的な波及効果は大きい
    - ・ 国内の他波長・理論研究のコミュニティは、中性子星・X線連星の研究で世界の中でも競争力がある
    - ・ 超新星爆発の研究コミュニティへのインパクト（高光度超新星がマグネターを駆動するという説もあり、爆発のメカニズムへの重大な示唆を与える可能性）

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 日本の独自性と優位性

◎水沢VLBI観測所におけるVLBI位置天文の経験の蓄積

◎JVN/EAVNおよびアジアへの拡張性

- 大学望遠鏡を中心とした高感度VLBIによる時間領域天文学への取り組みの実績（フレア星、 $\mu$ クエーサー）
- 低周波観測可能な大型望遠鏡との観測に向けた協力関係を構築済み

◎低周波観測や中性子星の研究に向けた技術的検討を継続

- 国内望遠鏡による研究の経験（単一鏡/VLBI）
  - ・ 単一鏡や鹿島-臼田基線によるGRPの観測、VERAによるマグネター観測
- 広帯域フィードの検討、低周波観測用の高温超電導フィルタの開発経験（水沢VLBI観測所や大学・企業との共同研究）
- パルス解析の技術的経験の蓄積、高感度観測に向けたパルサーゲートシステムの方法論の確立

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 要求性能・システム

| 研究課題 |                                   | 視野                                              | 分解能                              | 位置・運動<br>決定精度                                             | 感度                                | 時間分解能<br>(観測頻度)                                   | 周波数                   | 観測装置                                               |
|------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|
| 1    | 自転周期変化率の大きい中性子星のVLBI位置天文観測        | ～0.5平方度<br>@1GHz<br>(in-beam位<br>相補償が可能な<br>視野) | 50mas (d/<br>kpc) <sup>-1</sup>  | 50mas/yr (d/<br>kpc) <sup>-1</sup>                        | 0.2mJy (パル<br>サーゲート込<br>み)        | 定常パルス：周<br>期の0.1%<br>(20天体を月1<br>回 x 10年-15<br>年) | 0.7 - 24GHz<br>(同時観測) | EAVN-Low<br>SKA1-VLBI<br>u-VERA                    |
|      | 広帯域電波パルス観測による中性子星の進化と電波放射機構の関係    |                                                 |                                  |                                                           | 広帯域必須                             | 突発パルス：周<br>期の<0.1% (3<br>ヶ月間で10回<br>x 10天体)       | 0.7 - 24GHz<br>(同時観測) |                                                    |
| 2    | 系外超新星観測による若い中性子星の探査               |                                                 | 5mas                             |                                                           | 0.1mJy<br>(8Gbps/ch)<br><br>広帯域必須 | パルス周期の<br>0.1%<br>(年数回/天体 x<br>15年)               | <~10GHz               | EAVN-Low<br>SKA1-VLBI<br>u-VERA<br>(ngVLA@Low<br>) |
| 3    | VLBI位置天文観測による系内BH形成過程の探究          |                                                 | 4mas<br>10km/<br>s@10kpcの制<br>限→ | 0.04mas/yr<br>( $\mu < 0.2\text{mas/yr}$ を5 $\sigma$ で決定) | 0.1mJy<br>(8Gbps/ch)              | (monthly/天体<br>x 10年)                             | 10 - 20GHz            | EAVN-Low<br>(~5000km基<br>線)<br>VLBA                |
|      | 高空間・時間分解能観測によるBH連星のジェット形成・放射機構の研究 |                                                 | 0.4mas                           |                                                           | 広帯域必須                             | 30min<br>(10hr/yr/天<br>体)                         | 10 - 20GHz            |                                                    |

# 「VLBIから紐解くコンパクト星の誕生と進化」

## 研究計画

| 研究課題 |                                   | 準備研究 (FY2021)                                                                                                                                                          | 短期 (4期中期計画)<br>FY2022-2027                                                                                                                                                                                     | 長期 (10-20年先)<br>FY2028-                                                                    |
|------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | 自転周期変化率の大きい中性子星のVLBI位置天文観測        | <ul style="list-style-type: none"><li>・ 国内望遠鏡によるマグネターの追観測と解析技術の蓄積</li><li>・ 低周波広帯域受信システムのシミュレーション (電磁解計算)</li><li>・ 高温超伝導フィルターの概念設計および試作</li><li>・ 開発費用の見積もり</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・ VERA望遠鏡を用いた低周波システムの組み込み試験・評価</li><li>・ 海外基線も含めた低周波VLBIによる試験観測</li><li>・ 各波長域における高感度化検討・開発 (10GHz付近の2GHz化、低雑音化)</li><li>・ 2、3について、準備研究の結果を踏まえた上でモニター等本格観測への以降</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・ 広波長域の高感度アストロメトリ特化型観測装置によるSKAと相補的な研究分野の確立</li></ul> |
|      | 広帯域電波パルス観測による中性子星の進化と電波放射機構の関係    |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                            |
| 2    | 系外超新星観測による若い中性子星の探査               | <ul style="list-style-type: none"><li>・ JVN少数基線による発現後100年以内、3Mpc以内における検出可能SNeの探査 (5天体)</li><li>・ AGN放射との切り分けのためのイメージング観測の検討</li></ul>                                  |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                            |
| 3    | VLBI位置天文観測による系内BH形成過程の探究          | <ul style="list-style-type: none"><li>・ JVNによる低周波・少数基線アストロメトリの精度検証</li><li>・ 観測対象候補1 - 2天体 (e.g., Cyg X-3) のEAVN C帯による試験観測</li></ul>                                   |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                            |
|      | 高空間・時間分解能観測によるBH連星のジェット形成・放射機構の研究 | <ul style="list-style-type: none"><li>・ GRS1915+105のモニター継続による時間変動スケールの検証</li><li>・ JVN/VERAの低周波高感度化の検討</li></ul>                                                       |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                            |

# 極限天体班

## 現状報告まとめ

- ◎系内コンパクト天体の研究は国内のVLBIコミュニティとして、これまでは主力サイエンスではなかった
  - これまで蓄積したVLBI位置天文的手法により重要な科学的成果を生み出す可能性がる
  - 将来の大型計画とも相補的な研究になる可能性は大きい
  - cm波主体、時間領域、他波長との連携
- ◎研究計画や実現性は引き続き検討継続
  - 準備研究はすでに開始
- ◎開発項目は開発WGとも相談中