

見えてきたナノヘルツ重力波

高橋 慶太郎¹・喜久永 智之介²・
久野 晋之介¹・加藤 亮^{1,3}

〈¹ 熊本大学大学院先端科学研究部 〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1〉

〈² 熊本大学大学院自然科学教育部 〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1〉

〈³ 大阪公立大学数学研究所 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138〉

e-mail: keitaro@kumamoto-u.ac.jp



高橋



喜久永



久野



加藤

パルサータイミングアレイはミリ秒パルサーの精密観測によりナノヘルツの周波数をもつ重力波を直接検出する方法である。ナノヘルツ帯の主な重力波源としては超巨大ブラックホール連星や宇宙ひも、原始重力波などがあり、天体物理学にも宇宙論にも新たな観測手段を提供する。長年の国際的な取り組みの結果、最近ようやく背景重力波の兆候が見えてきており、ナノヘルツ重力波天文学の扉が開こうとしている。本稿ではパルサータイミングアレイの原理と最近の結果、そして今後の展望について解説する。

1. パルサータイミングアレイとは

パルサータイミングアレイ (PTA) とはミリ秒パルサーの精密観測によりナノヘルツ帯の重力波を直接検出する方法である。これまで20年以上にわたって観測が行われてきたものの検出には至っていなかった。しかし最近大きな進展があり、2023年6月に日本を含め世界各国のグループから同時に成果が発表された。もしナノヘルツ重力波が検出できるようになれば、地上干渉計に続いて重力波の第二の窓を開き、超巨大ブラックホールや宇宙の密度揺らぎ、宇宙ひも、暗黒物質などを探る新たな方法が得られる。またPTAの副産物としてミリ秒パルサーの放射機構や星間電離ガス分布などの情報も得られ、天文学・宇宙物理学への幅広い波及効果がある。本稿ではマルチ

メッセンジャー天文学や多波長重力波天文学において大きなポテンシャルをもつPTAの原理と最近の成果、感度を上げるための我々の研究を紹介する。さらに次世代電波望遠鏡SKA (Square Kilometre Array) の登場も含め、今後の見通しについて解説する。

2. パルサータイミングアレイの原理

パルサーは高速回転する中性子星で、磁極からビーム状に放射された電磁波が周期的なパルスとして観測される。電波で観測されることが多いが、可視光、エックス線、ガンマ線まで幅広い帯域で観測されるパルサーもある。PTAでは30ミリ秒以下の周期をもつミリ秒パルサーが用いられるが、これまでに見つかっている600個程度のミリ秒パルサーの中でも特に周期が安定な数十個が

選ばれて観測されている。

重力波は空間の歪みであり、パルサーと地球の間に重力波が存在すれば地球・パルサー間の距離が変動するため、周期的に観測されるはずのパルスの到着時刻が早まったり遅くなったりする。これが重力波のシグナルとなる。そこで重力波が存在しない場合のパルス到着時刻の予測と実際のパルス到着時刻の差、時刻残差 (timing residual) が重要な量となる。重力波が存在しなければ時刻残差は誤差の範囲でゼロとなるはずである。

重力波が存在すればその周波数に応じて時刻残差は変動するので、PTAで検出できる重力波の周波数はパルサー観測の頻度と期間によって決まる。例えば現在の典型的な観測として2週間に1度、10年間という数字を考えれば、重力波の周波数はだいたい1-100 nHzということになる。したがってパルサータイミングのターゲットはナノヘルツ帯域の重力波である。

後述するようにナノヘルツ重力波の重要な源は超巨大ブラックホール連星であるが、典型的な時刻残差の大きさは100ナノ秒程度と見積もられている。したがって10ミリ秒ごとに到着するパルスを10年間にわたって100ナノ秒の精度で測定しなければならない。これらの数字を見ただけでも重力波検出の難しさがわかる。

さらに検出を難しくしているのは重力波以外にもパルス到着時刻をずらす原因がいくつもあることである。ここに代表的なものを3つ挙げる。

(1) 星間電離ガス：星間電離ガスに起因する分散遅延により、電波周波数の2乗に反比例してパルス到着時刻が遅れる。また星間散乱により周波数の4乗に反比例してパルスの幅が広がり到着時刻決定に影響を及ぼす。これらは到着時刻の周波数依存性から補正できるが、星間電離ガスの分布は分スケールから年スケールで時間変動するのでこれを精密にモデル化しないと系統誤差が残ってしまう。

(2) 太陽系暦：パルサーからの電波は太陽系天体を作る重力場を通過して地球に到達する。このときシャピロー遅延という一般相対論的效果で電磁波の伝播が遅くなるため、太陽や惑星など太陽系天体の位置を正確に把握して補正する必要がある。また測定されたパルス到着時刻は太陽系重心での時刻に換算してモデルと比較される。太陽系重心は各天体の位置によるのでやはり位置の正確な把握が必要である。

(3) パルサーの内在的揺らぎ：先述の通りPTAではミリ秒パルサーの中でも特に周期が安定なものを使っている。それでもパルサーの周期には内在的な揺らぎ (ジッター) が存在していることが知られている。それがパルサーの内部構造に由来しているのか、磁気圏の何らかの不安定に由来しているのかは今のところわかっていない。

したがって時刻残差が有意にゼロからずれていてもそれが重力波によるものなのか、他の原因によるものなのかを判断することは難しい。そこで1つではなく多くのパルサーの時刻残差を比較することで重力波の情報を引き出す必要がある。これがパルサータイミング「アレイ」と呼ばれる所以である。特に重力波シグナルは以下の3つの性質をもつことを利用して検出が試みられている。

(1) 時間的相関：ナノヘルツ帯の重力波であれば時刻残差は年スケールで時間変動する。このような時間的相関をもつ時刻残差をレッドノイズとよぶ。重力波以外にも先述の星間電離ガスの効果や太陽系暦の誤差も一般に時間的相関をもつ。特に後者について、木星と土星の周期はそれぞれ11.9年、29.5年であり、これらとその高調波の時間スケールはターゲットとなる重力波の周期と同程度になるため特に注意が必要である。

(2) 共通レッドノイズ：重力波であれば複数のパルサーに共通した波形・スペクトルのレッ

ドノイズが現れるはずである。一方、星間電離ガスの効果は各パルサーで独立であると考えられるが、太陽系暦の誤差による太陽系重心の誤差は複数のパルサーに共通して現れる。

- (3) パルサー間相関：これは2つのパルサーの時刻残差の相関である。つまりあるパルサーのベアを考えたときに片方のパルサーで時刻残差が正であったとき、統計的にもう片方の時刻残差も正になりがちであれば正相関、負になりがちであれば負相関ということになる。星間電離ガスはもともとパルサーごとに独立なのでこのような相関は存在しない。一方、重力波と太陽系暦もしくは時計の誤差の場合には相関が存在する。両者とも、2つのパルサーを見込む角度によって相関の正負や強さが異なるが、重力波の場合は四重極を反映した空間パターン、太陽系暦の誤差の場合は双極子、時計の誤差の場合は単極子となる。重力波の場合の空間パターンをヘリングス・ダウンズ相関と呼んでおり、重力波検出の決め手となるものである。後述のようにこの相関は0度付近と180度付近で正の相関、90度付近で負の相関となっている。

3. 主なナノヘルツ重力波源

次にナノヘルツ帯の主な重力波源についてまとめる。まず一般論としてPTAによって重力波を検出するとき、遠方のたくさんの源からの重力波は背景重力波として検出され、比較的近傍に強い源があれば個別の源として検出される。

3.1 超巨大ブラックホール連星

最もスタンダードな源は超巨大ブラックホール連星である。銀河の中心には太陽の100万倍から10億倍もの質量をもつ超巨大ブラックホールが存在することがよく知られている。その起源や進化についてはよくわかっていないが、銀河衝突

のときにそれぞれの銀河の中心にあったブラックホールが連星を組み、重力波を放出して合体成長するというプロセスがキーになっていると考えられている。銀河衝突自体はよく観測されており、宇宙では頻繁に起こっているものと考えられる。ブラックホール連星が放出する重力波の典型的な周波数は以下のようになる。

$$f_{\text{GW}} = 2.3 \times 10^{-8} \text{ Hz} \left(\frac{a}{1 \text{ mpc}} \right)^{-3/2} \left(\frac{m}{10^6 M_{\odot}} \right)^{1/2}$$

ここで a は軌道長半径（mpcはミリパーセク）、 m はブラックホール質量で、ここでは2つのブラックホールは同じ質量をもつと仮定している。超巨大ブラックホール連星からの重力波は、もし連星が数百Mpc程度までの近傍に存在すれば将来的に個別の重力波源として検出できる。一方で遠方に存在するたくさんの超巨大ブラックホール連星からの重力波は背景重力波として検出できる。

ただし、超巨大ブラックホール連星の重力波放出は軌道長半径が1-10 mpc程度まで縮まないと効率が悪く、宇宙年齢の間にブラックホールは合体しない。銀河合体後、ブラックホール連星の角運動量は星による力学摩擦で1 pcあたりまでは効率的に引き抜かれるが、さらに1-10 mpcにまで縮ませるメカニズムはまだよくわかっていない。これがfinal pc problemである。逆に言えば、もし超巨大ブラックホール連星が頻繁に合体しているようであればそのようなメカニズムが存在するはずである。そして連星の角運動量引き抜きのプロセスは軌道長半径1-10 mpcのあたりで重力波に切り替わる。したがってこの軌道長半径前後に対応するナノヘルツ帯の重力波がfinal pc problemを探るヒントになるのである。実際、超巨大ブラックホール連星による背景重力波のスペクトルは、各赤方偏移での超巨大ブラックホール連星の数密度、超巨大ブラックホール連星の形成時の平均的な軌道長半径や離心率、そして重力波放出以外の角運動量引き抜きのプロセスの効率などに

よって決まる。

3.2 宇宙ひも

宇宙ひもとはミクロな太さをもつひも状の物体で、長さは銀河や銀河団、さらには宇宙論的スケールにも及ぶ。物理的には1次元位相欠陥であり、初期宇宙での相転移で形成される可能性がある。ここで相転移とは、宇宙の温度が下がり素粒子の相互作用の対称性が自発的に破れることによって起こる。

宇宙ひもは相転移で形成された後、互いに衝突してつなぎかえやループの形成が起こり現在まで残存する。ループ状の宇宙ひもはその振動によって効率的に重力波を放出すると考えられ、重力波の周波数はループのサイズによって決まる。したがって宇宙ひもはナノヘルツ帯だけでなくより広い帯域の重力波の源としてよく研究されている。宇宙ひもからの重力波は超巨大ブラックホール同様、背景重力波として検出可能であると同時にもし近傍に宇宙ひもが存在すれば個別の源としても検出できる。

宇宙ひもの生成条件は相転移において相互作用の対称性がどのように破れるかに関連しており、また重力波の強さは相転移のエネルギースケールで決まる。したがってPTAで地上の加速器では到達できない高いエネルギースケールの物理、特に素粒子の大統一理論を探ることができる。

3.3 相転移

宇宙ひもが形成されないような相転移でも、一次相転移では偽真空領域で満たされた宇宙に真の真空のバブルが形成される。そのバブルの膨張やバブル同士の衝突、プラズマ中の音波などにより重力波が生成される。相転移やバブル形成は宇宙全体で起こるので、これは背景重力波となる。生成される重力波の強さは相転移の温度や強さによって決まるため、重力波によってやはり初期宇宙の物理状態や素粒子モデルを探ることができる。

3.4 インフレーションによる原始重力波

インフレーション期に時空の揺らぎとして生成

された原始重力波は、マイクロ波背景放射のBモード偏光によって検出が目指されている。標準的なインフレーションモデルでは波長が短いほど重力波は弱く、ナノヘルツ帯では近い将来のPTAの感度では検出が非常に難しい。しかしある種のモデルでは短波長ほど重力波を強くすることが可能で、PTAによる検証の対象となる。また原始重力波は背景重力波としてのみ検出される。

3.5 密度揺らぎによる2次の重力波

インフレーション期には現在の宇宙の構造の種となる密度揺らぎも生成される。密度揺らぎ同士の重力的な相互作用で生成される重力波が2次の重力波とよばれるもので、背景重力波として観測できる可能性がある。ただし、原始密度揺らぎは少なくともマイクロ波背景放射で観測されているような宇宙論的スケールでは10万分の1程度と非常に小さなもので、標準的なインフレーションモデルではやはり小さなスケールほど密度揺らぎは小さくなる。するとそこから生成される2次の重力波も非常に弱く、PTAでの検出は難しい。

しかし最近、原始ブラックホール形成の文脈で、原始密度揺らぎがある特定のスケールだけで大きくなるようなインフレーションモデルが議論されている。モデルやパラメータ次第ではナノヘルツ帯の強い重力波を生み出すような原始密度揺らぎも可能である。したがってPTAではナノヘルツの周波数に対応し、マイクロ波背景放射や銀河サーベイでは測れないようなパーセクスケールの原始密度揺らぎを探ることができる。

3.6 暗黒物質

最後に、重力波源ではないがPTAで探ることができるものとして、暗黒物質に触れておく。PTAでは、超軽量暗黒物質と原始ブラックホールという二つの暗黒物質候補を検証できる。

超軽量暗黒物質とは通常物質との相互作用が弱くまた質量が非常に小さいボゾンであり、粒子ではなく波として振る舞うという特徴がある。超軽量暗黒物質によって地球やパルサーで重力ポテ

ンシャルが振動したり、両者に引力が働いたりすることがある。質量が 10^{-24} – 10^{-21} eV程度の場合にはPTAでその効果を測ることができる。

また原始ブラックホールとは宇宙初期に作られたブラックホールである。地球やパルサーの近くをそのような重い物体が通過した場合、パルスの到着時間が変化し、PTAでは太陽質量程度の重さをもつ原始ブラックホールの検証が可能である。

4. 背景重力波の証拠

最近の成果について説明するために、先に世界のPTAの研究体制について述べておく。まず15年以上のデータの蓄積がある老舗のグループとしてヨーロッパのEPTA (European PTA)、北アメリカ地域のNANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves)、オーストラリアのPPTA (Parkes PTA) の3つがある。新興のグループとしてはインド+日本のInPTA (Indian PTA)、中国のCPTA (Chinese PTA)、南アフリカ共和国のMPTA (MeerKAT PTA) がある。これらはまだ数年間分のデータしか蓄積していないが、それぞれuGMRT, FAST, MeerKATという最新鋭の電波望遠鏡を用いておりデータの質が非常に高いため、急速に存在感を増しつつある。また、上記の6つのグループのうちEPTA, NANOGrav, PPTA, InPTAはIPTA (International PTA) という国際コンソーシアムを組織している。PTAではまだ重力波が検出されたことがなくデータ解析法も確立されていないため、これらのグループはライバルでありつつも共通の目標を目指す仲間でもある。そのためこれまで国際会議やサマースクールなどを通して観測・データ解析法に関する情報交換、若手の育成などについて密接に協力してきた。

筆者たちを含む日本チームが参加するInPTAは2015年からPTAの観測を始めており、100 MHz帯をカバーするuGMRTを用いているところに独自性がある。uGMRTは口径45 mのパラボラアンテ

ナ30台からなる大規模な電波干渉計で、100 MHz帯では世界で最も良い感度を持ちSKAの先行機にもなっている。通常、パルサーは1.4 GHz帯で観測されるが、InPTAはuGMRTのBand 3 (300–500 MHz) とBand 5 (1260–1460 MHz) で同時観測を行っている。これはPTAの系統誤差の大きな要因であり、周波数の2乗に反比例して大きくなる分散遅延を精密に測るためである。例えばPSR J1939+2134に関して分散度 (dispersion measure) の決定は1億分の1の精度を達成している。2022年に我々はInPTAとして初のデータリリースを行った[1]。

2023年6月末、EPTAとInPTAの共同チーム[2], NANOGrav [3], PPTA [4], CPTA [5]がこれまでの成果を同時に発表したが、これも発表のタイミングや内容などを協議したうえでのものである。ただし、密接に協力はしつつも観測データや解析はあくまで別個に行われた独立の成果である。総じてこれらのグループの結果は互いに矛盾しないものであり、「ナノヘルツ背景重力波の証拠が得られた」というものであった。ここで「証拠」という言葉は、重力波シグナルの最大の特徴であるヘリングス・ダウンズ相関が 3σ 程度の有意性で確認されたという意味で使っている。IPTAでは 5σ を「検出」と定義しているため、このような表現となった。

具体的な内容について、EPTA+InPTAチームの結果を紹介する。先述のようにEPTAとInPTAは独立のグループであるが、今回はデータを結合し共同で解析を行った。EPTAの観測は最大25年に及ぶ一方、InPTAは3.5年のデータしかない。しかしInPTAは低周波の観測を行っているため、分散遅延のモデルを改善し系統誤差の軽減に寄ることができるのである。

図1は解析に用いた25個のパルサーの天球面分布である。パルサーは基本的に銀河面に多いが、ヘリングス・ダウンズ相関のシグナルを得るために天球面上で様々な離角をもつパルサーペア

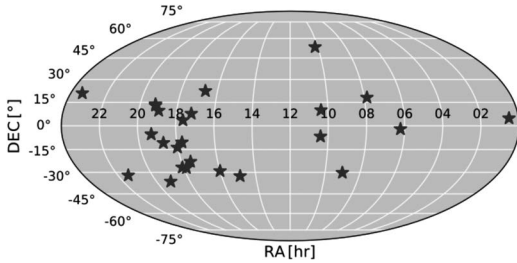


図1 EPTA+InPTAで使われたミリ秒パルサーの天球面分布[2].

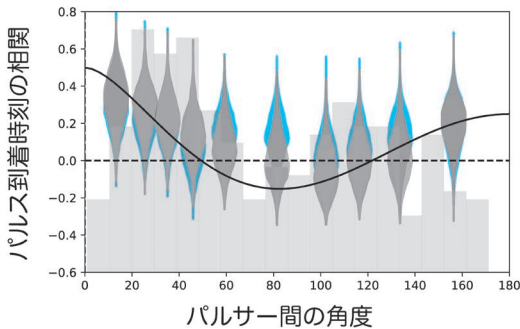


図2 共通レッドノイズのパルサー間相関[2]. 曲線は重力波の場合に期待されるヘリングス・ダウンス相関. 2つのデータセットが示されているがほぼ重なっている. 曲線は重力波の場合に期待されるヘリングス・ダウンス相関, 棒グラフはその角度差をもつパルサーペアの数を示す.

ができるように観測するパルサーを選定している. 解析においてはまず25個のパルサーのそれぞれについてノイズモデルを構築し, ホワイトノイズやレッドノイズの大きさ・周波数依存性などを見積もる. その結果, 複数のパルサーに共通のレッドノイズが同定された.

共通レッドノイズのパルサー間相関が図2に示されている. ここでは25個のパルサーから300のパルサーペアが作られ, 横軸のパルサー間角度は10の区間に区切られている. 相関に対する誤差棒は大きいものの, おおむねヘリングス・ダウンス相関の曲線に沿っている. 実際, 共通レッドノイズのパルサー間相関として無相関, 単極型, 双極型, 四重極型の4つのモデルをベイズ因子で

比較すると, 四重極型が最も強く支持される. さらに, このパルサー間相関の統計的有意性を見積もるために, 実際のパルサーと同じノイズ特性をもち, 以下の2つの方法でパルサー間相関を持たない模擬観測データを作成した.

- (1) 共通レッドノイズのフーリエ成分にランダムな位相を加える
- (2) パルサーの天球面上での位置をランダムに変える

そして四重極型のモデルで実際のデータ以上のベイズ因子が得られる確率を算出することで, 今回のデータのヘリングス・ダウンス相関の統計的有意性は 3σ 程度であると見積もられた. これが「証拠」である.

図3はヘリングス・ダウンス相関をもつ共通レッドノイズのパワースペクトルである. 30 nHz以下の低周波で有意なシグナルが得られていることがわかる. 低周波でのパワースペクトルはべき型と矛盾せず, べき型で回帰したときのべき指数は $2.71^{+1.18}_{-0.71}$ となり, 周期1年の重力波の振幅の常用対数は $-13.94^{+0.23}_{-0.48}$ となった.

5. 物理的解釈

先述のように今回の結果の統計的有意性は「検出」までには至らないが, もし図3のスペクトルが本当に背景重力波であるとすれば天文学的・宇宙論的にはどのような示唆が得られるだろうか. まず今回測定された重力波スペクトルにおいて, 統計的に有意な振幅が得られた帯域は狭く, その誤差も大きいため, スペクトルがべき型なのかどうかを判断することは難しく, またべき型だと仮定した場合のべき指数の不定性も大きい. したがって3章で挙げられているどの重力波源でも基本的にはパラメータを調整すれば合わせることができる. 逆にいうと, 今回の結果で重力波源を特定することは難しい.

そこでここでは最も標準的なシナリオとして, 重力波源が超巨大ブラックホール連星だとしたら

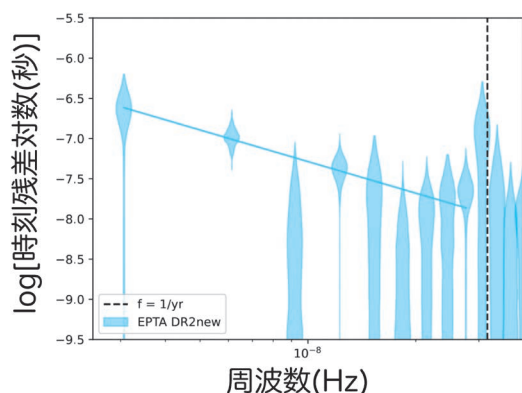


図3 ヘリングス・ダウンズ相関をもつ共通レッドノイズのパワースペクトル [2].

どのような示唆が得られるかについて説明する。まず (1) 式を見ると、有意な振幅が得られた $1\text{--}30\text{ nHz}$ という帯域は軌道長半径が $10\text{--}100\text{ mpc}$ の連星に対応することがわかる。まさに final pc problem の帯域である。この帯域では連星の角運動量は重力波放射もしくは他の天体物理学的な要因によって引き抜かれていると考えられる。もし角運動量が重力波放射によってのみ引き抜かれているとすると、背景重力波のスペクトルはべき指数 $13/3$ のべき型になることがわかっているが、前章の測定値 $2.71^{+1.18}_{-0.71}$ はこの値に比べて 2σ 程度小さい。これは $13/3$ と矛盾がないとも言えるし、有意にずれていると考えれば重力波放射以外のプロセスが効いていると言うこともできる。

一方、背景重力波の振幅は超巨大ブラックホール連星の数密度によって決まる。銀河衝突率は観測でよくわかっているの、銀河衝突のあと連星の軌道がどのくらいの時間で重力波放射が効くところまで縮まるかによって決まることになる。したがって背景重力波の振幅は角運動量引き抜きの効率に直結するのである。今回得られた振幅の値は、銀河衝突率から予想される値の上限に近い [2]。つまり銀河が衝突してほとんどタイムラグなしに連星が形成され重力波が放射されるくらいでない、今回の振幅を説明できないのである。すると

それを可能にする非常に効率的な角運動量引き抜きのメカニズムが存在することが示唆される。これは銀河衝突後のダイナミクスについて大きな示唆であろう。

6. 検出に向けて

今後、背景重力波を検出しさらに個別の天体からの重力波も検出するには、パルサーの数を増やしたり観測期間を伸ばしたりするとともに、様々な系統誤差を減らしていく必要がある。以下では感度を上げるために我々が進めているいくつかの試みを紹介する。

6.1 パルサーサーチ

1967年に初めてパルサーが発見されて以来、世界中の望遠鏡によるサーベイにより今日ではその数は3400個程度にまで増加した。PTAの感度向上のためには周期の安定したミリ秒パルサーの数を増やす必要があり、またどの方向にあるかわからない個別の重力波源を検出するにはミリ秒パルサーが天球面上に満遍なく分布していることが重要となる。それには全天にわたるサーベイによって地道に新しいパルサーを発見していくほかにない。

ところがパルサーサーチは非常にコストが高い。パルサーのほとんどは暗いため個々のパルスを観測することはできず、周波数方向、時間方向に積分しなければパルスは見えない。周波数方向に積分するには分散度に応じて分散遅延を考慮しなければならず、時間方向に積分するには周期を知っている必要がある。そこでパルサーサーチでは、まず特定の領域の観測データに対して分散度を仮定して時系列データをフーリエ変換し、周期性を探す。これを様々な分散度の値で試し、フーリエスペクトルにピークが見られたらその周辺の周期で時系列データを畳み込み (folding)、本当に周期的なパルスがあるかどうかを見るとともに正確な周期を見積もる。さらに、ミリ秒パルサーは連星を組んでいることが多いため、連星の運動

の補正も必要となり、加速度のパラメータを決めるためにさらに計算コストが高くなる。

したがって効率よくパルサーを探すためには候補を絞って観測することが重要となる。その1つのアプローチとして、ガンマ線やエックス線を放射する高エネルギー天体、特にフェルミガンマ線宇宙望遠鏡のカatalogから候補を選び観測する取り組みが精力的に行われており、これまで136個のミリ秒パルサーが発見されている。我々はアメリカのグループと共同で、現在ミリ秒パルサーがあまり見つけられていない領域に存在するカatalog天体を重点的に観測した。その結果、2つのミリ秒パルサーを検出している。またもう1つアプローチとして、我々はコストの低い電波撮像サーベイカatalogのデータから機械学習でパルサー候補を選び出す手法を提案した [6]。

6.2 パルサーの内在的揺らぎ

ジッター、つまりパルサー周期の内在的揺らぎは時間的相関がなく時刻残差がランダムに変動するホワイトノイズである (図4)。その大きさはパルサーごとに異なり、波長が同じであれば観測装置には依存しないので、パルサーそのものに由

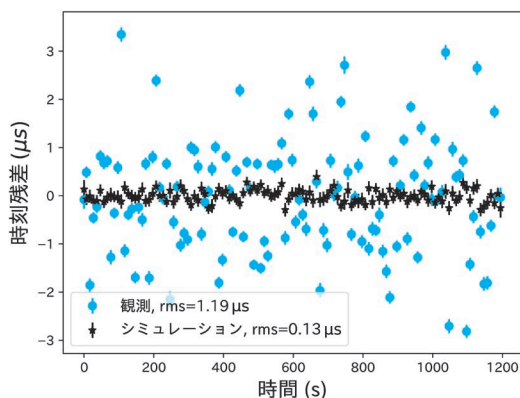


図4 PSR J0437-4715の時刻残差 [7]。青点が観測、黒点が観測誤差をもとにしたシミュレーションによる時刻残差を示す。各点は10秒ごとに積分したパルスの到着時刻から得られた。観測された時刻残差は誤差棒より有意に分散しており、ジッターの存在を示す。

来する物理現象であり、特にパルス波形の確率的な変動により生じると考えられている。ホワイトノイズであるから積分時間の平方根に反比例して小さくなるが、逆に望遠鏡の感度を上げてパルスのS/Nが向上しても軽減できない。これはPTAにとって大きな問題で、次世代の望遠鏡で感度が向上しても、ジッターの存在により観測時間をある程度以上短くできず望遠鏡の性能を十分に発揮できないことになる。したがって、ジッターを現行の観測機器で測定し、各パルサーのジッターの特性を調べておくことは将来の観測計画立案のために重要である。

先行研究として、最も明るいミリ秒パルサーとして知られるPSR J0437-4715のジッター特性がParkes 64 m望遠鏡とMeerKATによって測られており、1時間積分した値でそれぞれ 49 ± 0.8 ナノ秒、 50 ± 10 ナノ秒である。またジッターは観測周波数が高いほど小さくなるという傾向が見られているが、先行研究はともに730 MHzより上の周波数での観測に限られている (図5)。

我々はより低い周波数帯でのPSR J0437-4715のジッターを調べるため、2021-2023年にInPTAで取得したBand 3 (300-500 MHz) とBand 5 (1260-1460 MHz) のデータから、S/Nの高かった観測を選定してジッターを測定した [7]。Band 5

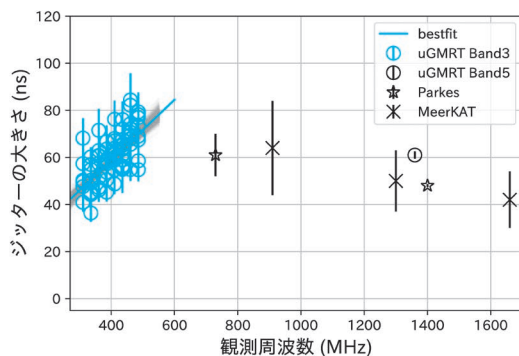


図5 Band 3観測から得たジッターの周波数依存性 [7]。青点はジッターの大きさ、黒線はベイズ線形回帰で得られた事後分布から500点をランダムに選んで引いた直線を表す。

は平均で 56.2 ± 1.6 ナノ秒であり、先行研究と矛盾しない結果であった。一方で、先行研究から Band 5 よりも大きくなると予想された Band 3 では平均で 53.2 ± 0.9 ナノ秒となり、Band 5 と同程度の値が得られた。

さらに、我々は Band 3 を 8 個のサブバンドに分け、各サブバンドでジッターを測定した (図 5)。興味深いことに、Band 3 の中でジッターは高周波ほど大きくなる傾向を示していた。実際、ベイズ線形回帰で傾きを調べたところ、 10σ 以上の有意性で正の傾きを持っていた。この結果は、低周波観測ほどジッターが大きくなるという先行研究と相反するもので、Band 3 と 1 GHz 帯の間の 500–700 MHz 付近にジッターのターンオーバーがあることを示している。今後、Band 4 (550–750 MHz) の観測で、ターンオーバー周波数を特定していく予定である。

また我々の結果は Band 3 よりも低い 100 MHz 帯を観測できる MWA や SKA-LOW で、ジッターの影響をあまり受けずに高精度なタイミング観測を行える可能性を示唆する。これまで他のパルサーについてはジッターの周波数依存性はあまり調べられていないので、我々は今後他のパルサーについても同様の解析を行い、高精度低周波タイミング観測の可能性を探っていく。

6.3 重力波検出から重力波天文学へ

PTA の感度が上がっていけば、背景重力波だけではなく超巨大ブラックホール連星や宇宙ひもなど近傍の個別重力波源からの重力波も検出できると期待されている。超巨大ブラックホール連星は連続波の重力波を放出し、その波形や振幅からブラックホール質量・軌道長半径・離心率などの軌道要素を知ることができる。またループ状の宇宙ひもはバースト状の重力波を放出するが、その波形や振幅からループのサイズや宇宙ひもの質量密度を推定できる。

ただし、一般的に PTA の個別重力波源に対する角度分解能はあまりよくない。天球面上の重力

波源の位置とパルサーの相対的な位置関係によって各パルサーのシグナルが変わるため、重力波源の位置を推定できる。パルサーが多いほどより角度分解能は良くなるが、100 個程度のパルサーを用いても角度分解能はせいぜい数十平方度である。近い将来 PTA で検出できると期待できる超巨大ブラックホール連星の距離が 1 Gpc 程度であるから、仮に重力波を検出できたとしてもその角度分解能では母銀河を特定することは難しい。これでは重力波「天文学」にはならない。

そこで我々はパルサーの距離を重力波波長よりもよい精度で測ることで、PTA の角度分解能が劇的に向上することを示した [8]。PTA の時刻残差には地球・パルサーそれぞれにおける空間の歪みの影響が入ってくる。実は PTA のデータ解析においてパルサーにおける空間歪みの効果を考慮に入れるには、パルサーまでの距離を正確に知っておく必要がある。しかし現在のところパルサーの距離の測定精度は典型的には 100 pc 程度、よくてもせいぜい 10 pc 程度であり、ターゲットにしている重力波波長 (< 3 pc) より大きい。このような場合、パルサーまでの距離はフリーパラメータとして扱われるため、パルサーにおける空間歪みの情報は実質的に考慮されないことになり、重力波への感度が悪くなるとともに角度分解能が悪くなるのである。

しかし SKA が登場し、他の電波望遠鏡と組み合わせた VLBI 観測によるアストロメトリを行うと、比較的近傍 (数百 pc) のパルサーに対して 1 pc かそれ以上の精度で距離を測ることができると期待される。したがって少なくとも近傍のパルサーの空間歪みの効果を考慮に入れることができる。

我々は PTA で用いているパルサーのうち、いくつかのパルサーの距離が精密に決まったときに重力波源の位置決定精度がどの程度改善するかのシミュレーションを行った。そのために、重力波源としてブラックホール連星を仮定し、天球面上に一様に分布する 12 個のパルサーに対して仮想

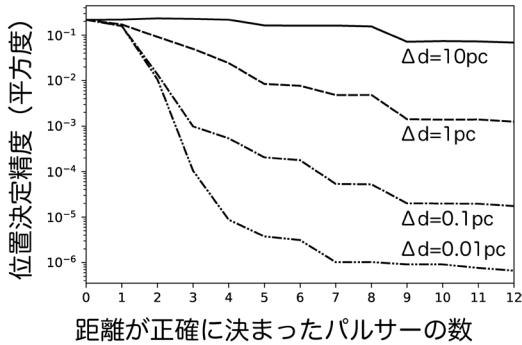


図6 重力波源の位置決定精度 [8]。横軸は精密に距離が測定されたパルサーの数であり、誤差の値 (Δd) も示されている。

的な重力波の観測データを作成した。ここで重力波の波長は1 pc, ホワイトノイズの大きさとしてはSKA時代に達成可能な10ナノ秒を仮定している。そして、正確に距離が測定されたパルサーの数に応じて、重力波源の位置決定精度がどのように変化するかを、ベイズ的パラメータ推定によって求めた。図6はその結果で、縦軸は位置決定精度、ここでは天球面上の重力波源の位置の不定性 1σ の等高線の面積である。横軸は距離が精密に測定されたパルサーの数（誤差は図中に示されている）で、それ以外のパルサーは100 pcの誤差としておりパルサーの総数は12個に固定されている。

まず図6の左端はどのパルサーも距離誤差が大きい現在の状況を表している。このときの重力波源の位置決定精度が0.2平方度と先行研究よりずっと小さいのは、パルサーの距離測定の影響を見やすくするためPTAのデータ解析モデルを単純化して一部の系統誤差を無視しているからである。図から、4個のパルサーでも距離誤差が1 pcであれば重力波源の位置決定精度は1桁向上し、9個でもう1桁向上する。さらに距離誤差が0.01–0.1 pcであれば2個のパルサーで1桁向上し、正確な距離をもつパルサーが増えるごとに劇的に位置決定精度が向上する。

以上のように、一部のパルサーであっても距離

が重力波の波長よりよい精度で決まっていれば位置決定精度は大きく向上する。1 Gpcまでの距離の銀河の天球面数密度は1平方度あたり 10^3 個程度であるから、位置決定精度を 10^{-3} 平方度まで上げれば重力波源の母銀河を特定できる。したがってSKA時代には単に重力波を検出するだけでなく、重力波天文学を実現できるようになるだろう。これにより、ブラックホール質量・軌道長半径・離心率などの情報を持った超巨大ブラックホール連星カタログが作られることになる。

7. まとめと展望

以上のように20年以上の国際的な取り組みを経て、PTAはようやくナノヘルツ重力波に手が届こうとしている。ナノヘルツ重力波により現代天文学の大きな謎である超巨大ブラックホールの形成・進化の謎に迫るとともに、宇宙ひもや原始重力波など初期宇宙の現象を探ることもできる。

今後の見通しとしては、各PTAが観測を続けてデータを蓄積していくことはもちろんであるが、まだ観測期間は短いものの最新鋭の電波望遠鏡を用いているInPTA・MPTA・CPTAの存在感は急速に増していきだろう。一方、IPTAでは現在までの各PTAのデータを統合してより感度を上げることが試みられている。各PTAで使われているパルサーには重複があるが、110個程度のパルサーのデータが統合される予定である。

そして5年後にはSKAが登場する。SKAは南アフリカ共和国に設置され1–10 GHz帯をカバーするSKA-MIDと、オーストラリアに設置され100 MHz帯をカバーするSKA-LOWからなる次世代電波干渉計である。2021年から建設が始まり2029年に完成する予定で、宇宙再電離・宇宙磁場・銀河進化・銀河系・星惑星形成・宇宙論・系外惑星など様々な科学目標がある中で、パルサーは重点サイエンスの1つである。SKAのパルサー観測性能は現存の電波望遠鏡に比べて圧倒的で、新たなパルサーを見つけるためのサーベイと

現在のPTAのパルサーの精密観測が並行して行われる。

科学的な内容の見通しとして、背景重力波に関してはまずIPTAによるデータ統合での初検出が期待されている。その後、重力波スペクトルを精密に測定できれば背景重力波源を同定したり、そのモデルを制限したりできるようになるだろう。特に超巨大ブラックホール連星については銀河衝突後のダイナミクスや銀河中心領域の環境・物理プロセスを探れるようになる。SKAによるPTAの感度は 10^{-16} 程度になると期待され、これは現在得られている重力波振幅($\sim 10^{-14}$)の100分の1である。したがってもし複数の重力波源が寄与していれば、それぞれを同定できるようになるかもしれない。また背景重力波の非等方性も重力波源の性質を反映する重要な観測量であり、これもSKA時代には検出できる可能性がある。

次に個別重力波源であるが、現行のPTAが感度を上げていけば近傍の超巨大ブラックホール連星からの重力波の検出が期待でき、感度が上がっていくごとにその数が増えていくだろう。そしてSKA時代には赤方偏移6以上の遠方の超巨大ブラックホール連星からの重力波も検出できると見積もられている。さらに6.3節で述べたようにVLBI観測を行うことで重力波源の位置を精密に決めることができるようになれば、超巨大ブラックホール連星のカタログを作ることができるだろう。

ナノヘルツ重力波天文学の扉は今開こうとしている。これは多波長重力波天文学の始まりでもあり、またマルチメッセンジャー天文学がさらに強化されることも意味している。

参考文献

- [1] InPTA: Tarafdar, P., et al., 2022, PASA, 39, e053
- [2] EPTA+InPTA: EPTA Collaboration and InPTA Collaboration, Antoniadis, J., et al., 2023, A&A, 678, 50 など6編
- [3] NANOGrav: Agazie, G., et al., 2023, ApJL, 951, L8 など8編
- [4] PPTA: Reardon, D. J., et al., 2023, ApJL, 951, L6 など3編
- [5] CPTA: Xu, H., et al., 2023, RAA, 23, id.075024
- [6] Yonemaru, N., et al., 2020, MNRAS, 494, 1035
- [7] Kikunaga, T., et al., 2024, PASA, 41, e036
- [8] Kato, R. & Takahashi, K., 2023, PRD, 108, 123535

Emerging Nano-Hz Gravitational Waves

Keitaro TAKAHASHI¹, Tomonosuke KIKUNAGA¹,
Shinnosuke HISANO¹, and Ryo KATO^{1,2}

¹*Faculty of Advanced Science and Technology,
Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami,
Kumamoto 860-8555, Japan*

²*Osaka Central Advanced Mathematical Institute,
Osaka Metropolitan University, 3-3-138
Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan*

Abstract: Pulsar Timing Array is a method for directly detecting gravitational waves in the Nano-Hz range through precise observations of millisecond pulsars. Main sources of gravitational waves in the Nano-Hz band include supermassive black-hole binaries, cosmic strings, and primordial gravitational waves, offering new observational capabilities in both astrophysics and cosmology. As a result of international efforts, signs of background gravitational waves are finally becoming visible, and the Nano-Hz gravitational-wave astronomy is about to start. This article provides an explanation of the principles of Pulsar Timing Array, recent findings, and prospects for the future.