

# パルサー観測がつかんだ背景重力波の証拠

## 1. はじめに

2023年6月の末、ヨーロッパ、北米、オーストラリア、インド、日本、中国など世界各国の研究機関から一斉に「パルサータイミングアレイによりナノヘルツ背景重力波の証拠を初めてとらえた」という発表がなされた。研究内容もさることながら、国際的な研究体制も複雑であったためプレスリリースやニュース記事ではなかなか理解が難しかったと思われる。そこで本稿で簡潔に解説する。

## 2. 重力波

アインシュタインの一般相対性理論によると重力とは空間の歪みであり、空間の歪みが波として伝播するものが重力波である。これは電磁場の波である電磁波に類似しているが、電磁波が電荷分布の双極子の変動によって放射される一方で重力波は質量分布の四重極の変動によって放射される。典型的な重力波源はブラックホールや中性子星などの重くてコンパクトな天体の連星である。

重力波はアインシュタインによって1916年に予言されたから約百年後の2015年、レーザー干渉計LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) によって初めて検出された。LIGOが検出した重力波は100 Hz程度の周波数を持ち、太陽の30倍程度の質量の2つのブラックホールが合体したときに放出されたものであった。この業績により、LIGOの代表者たちは2017年にノーベル物理学賞を受賞した。同様のレーザー干渉計として日本のKAGRA (Kamioka Gravitational wave detector) やヨーロッパのVirgoなどがあり、重力波によって宇宙を探る重力波天文学が始まった。

電磁波では周波数が違えば性質が異なり、放射源、検出法、用途も大きく異なるが、この事情は重力波でも同様である。本稿で紹介するパルサータイミングアレイのターゲットは1~10 nHzの周波数を持った重力波で、周期にして数年から数十年ということになる。また、本稿では詳しく述べないが1 mHzの周波数帯の重力波はDECIGOやeLISAなど宇宙機を用いた宇宙干渉計によって、宇宙論的な波長を持った $10^{-18}$  Hzの周波数の重力波は宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光によって検出が試みられている。

今回証拠が得られたのはナノヘルツ帯の背景重力波の存在である。背景重力波とは宇宙のあらゆる方向から来る重力波で、個別の重力波源を分解して検出できない状態である。天の川は多くの点状の光源(恒星)の集まりであるが、肉眼では分解能が悪いために連続的な光の分布に見えるの

と同様である。

## 3. パルサータイミングアレイ

パルサータイミングアレイとはパルサーと呼ばれる天体の観測により重力波を検出する方法である。レーザー干渉計による検出と同様、これは「直接検出」に分類される。パルサーの正体は高速に回転し強い磁場を持つ中性子星であり、これまでにパルサーは3,000個以上見つかった。パルサーにおいては磁軸の方向に狭い電磁波のビームが放射されるが、磁軸と回転軸がずれておりビームが地球方向を向くときだけ電磁波が観測されるため、観測者には周期的なパルスとして観測される。その周期は中性子星の回転の周期で、典型的には数ミリ秒~10秒程度である。周期が長期間にわたって非常に安定しているため、パルサーは「宇宙の時計」と呼ばれ、一般相対論の検証や重力波の間接検出にも利用されてきた。パルサータイミングアレイでは、周期が30ミリ秒以下の「ミリ秒パルサー」で、中でも特に周期が安定しているものを複数個電波で観測する。

パルサーと地球の間を重力波が通り過ぎると、空間の歪みのためパルサーと地球の間の距離が変化し、周期的なはずの電波パルスの到着が遅れたり早まったりする。このズレを測ることで重力波を検出できるが、ズレは典型的には100ナノ秒程度である。したがってパルス到着時刻をマイクロ秒より良い精度で計測する必要があり、しかも重力波の周期は数年であるから、10年以上にわたって観測を継続しなければならない。

ただし、パルスの到着時刻に影響する要因は重力波以外にも複数あり、それらを徹底的に理解して系統誤差を差し引かないと重力波シグナルを同定することはできない。例えば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ので、一般相対論的効果であるシャピロ遅延が起こる。したがって太陽系天体それぞれの質量や軌道要素の見積りに誤差があると、パルス到着時刻の予言に誤差が生じる。また、星間空間のプラズマにより電波の分散遅延が周波数に応じて起こるが、これも正確に見積もらなければ系統誤差として残る。パルサータイミングアレイでは様々な系統誤差の確率モデルを作った上で、重力波シグナルの以下の3つの特徴を利用して検出を試みる。1つ目は「長時間相関」で、重力波によるパルス到着時刻のズレは数年という時間スケールで変動する。2つ目は「共通シグナル」で、1つのパルサーだけでなく多くのパルサーで共通したシグナルが見られる。最後は「パルサー間相関」

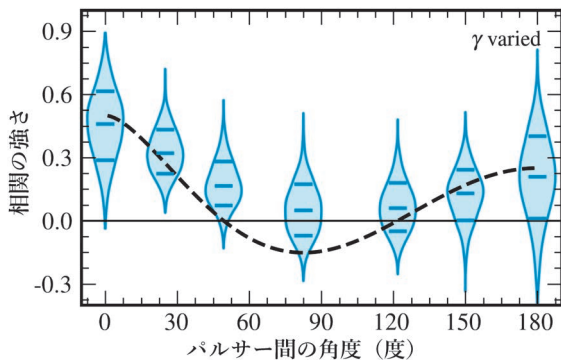


図1 NANOGravの観測データによるパルサー間相関。<sup>1)</sup> 横軸はパルサー間の角度で縦軸は相関の強さ。破線は重力波の場合の理論的相関。

で、重力波が四重極の空間的歪みを引き起こすことを反映し、2つのパルサーのパルス到着時刻のズレの間にパルサー間の角度に応じて相関が生じる。この相関関係を Hellings & Downs 相関と言ひ、重力波検出の決め手となる(図1)。

#### 4. 背景重力波の証拠

現在、パルサータイミングアレイは世界で6つのグループが行っている。そのうち3つは15年以上にわたって観測を継続している老舗で、ヨーロッパのEPTA、北米のNANOGrav、オーストラリアのPPTAである。一方残りの3つであるインド・日本のInPTA、中国のCPTA、南アフリカ共和国のMPTAはまだ5年程度の歴史しかないが、いずれも最新鋭の電波望遠鏡を用いた観測を行っている。また、パルサータイミングアレイはこれまでシグナルを検出したことがなかったため、これらのグループはライバルでありつつも密に情報交換や研究協力をしており、特にEPTA、NANOGrav、PPTA、InPTAは国際コンソーシアムIPTAを結成してデータの共有や国際会議の開催、学生の教育などを行っている。

上記のうち、EPTAとInPTAの共同グループ<sup>2)</sup>(EPTA+InPTA)、NANOGrav、<sup>1)</sup>PPTA、<sup>3)</sup>CPTA<sup>4)</sup>の4つのグループが発表のタイミングや内容を調整し、2023年6月末に様々な形で成果発表を行った。それぞれ25年、15年、18年、3年の観測データを元にしており、これまで密に協働してきたがあくまで独立した結果である。グループやデータセット、解析法などにより結果は若干異なるが、重力波検出の決め手である Hellings & Downs 相関が $2\sim 4\sigma$ の有意性で認められた(図1)。ただし、IPTAでは以前より背景重力波の「検出」の基準を $5\sigma$ としていたため、今回の結果は「検出」とは呼んでいない。それでも $2\sim 4\sigma$ の有意性があり、またシグナルの時間的パワースペクトルもグループ間で類

似しているため、背景重力波の「証拠」を得たと表現している。

今回の結果で背景重力波が発見されているとしたら、それはどこから来たものなのだろうか。最も有力な候補は超巨大ブラックホール連星である。宇宙には数多の銀河が存在するが、その中心部には太陽の100万倍から10億倍の質量を持つブラックホールが存在する。しかしそのようなブラックホールがどのようにして形成されたのかは現代宇宙物理学の大きな謎となっている。一説として、宇宙138億年の歴史の中で銀河同士が衝突合体する度にその中心にあるブラックホール同士が連星を形成し、重力波の放出を経て合体するということを繰り返して成長してきたという可能性がある。これが正しければ宇宙の至る所で2つのブラックホールが連星を組んで重力波を放射し、背景重力波を生んでいると考えられる。また、重力波放射だけが連星の角運動量の引き抜きに寄与しているとすると、パルス到着時刻のズレのパワースペクトルはベキ型になりその指数は $13/3$ になることがわかっている。今回の結果は指数 $13/3$ のベキ型パワースペクトルと矛盾しないものであった。

背景重力波のその他の候補として、宇宙ひもからの重力波やインフレーションによる原始重力波、もしくは原始密度揺らぎの非線形相互作用による二次的な重力波などがある。これらはパワースペクトルによって区別できる可能性があるが、今回の結果にそこまでの精度はない。

#### 5. まとめと展望

これまで20年以上にわたって国際的な共同研究体制のもとに行われてきたパルサータイミングアレイはようやく実りつつある。今後は各グループがデータをさらに積み上げるとともに、各グループのデータを統合することで重力波に対する感度を上げて「検出」に到達できるだろう。また2020年代後半には次世代電波望遠鏡SKA(Square Kilometre Array)が登場し、パルサーの観測能力は飛躍的に高まる。そして背景重力波の精密観測とともに個別の重力波源の観測が可能になると期待できる。LIGOから始まった重力波天文学は、パルサータイミングアレイにより多波長重力波天文学へと進化しようとしているのである。

#### 参考文献

- 1) G. Agazie et al., *Astrophys. J. Lett.* **951**, L8 (2023).
- 2) J. Antoniadis et al., to be published in *Astron. Astrophys.* (2023).
- 3) D. J. Reardon et al., *Astrophys. J. Lett.* **951**, L6 (2023).
- 4) H. Xu et al., *Res. Astron. Astrophys.* **23**, id.075024 (2023).

高橋慶太郎(熊本大学大学院先端科学研究部  
keitaro@kumamoto-u.ac.jp)

(2023年9月3日原稿受付)