

X線パルサー J0537-6910 の回転速度が急激に遅くなっている理由は何か？

パルサーは大質量の星が崩壊してできたコアが、高速回転している中性子星* (下記の用語集参照) です。太陽よりも質量が大きく、大きな都市よりも小さなサイズの究極な天体です。密度はとても大きく、紅茶スプーン一杯分の中性子星で、1000万トン(地球上の山ひとつ分程度)にもなり、中性子星のもつ磁場の大きさは、地球の磁場よりも100万倍の100万倍の100万倍の100倍ほどの大きさになります。

パルサーは、それらの磁極から連続的に放射される電磁波のビームによって観測されます。この放射は連続的ですが、パルスでしか観測されないため、「パルサー」という名前が付けられています。これは、磁場がパルサーの回転軸と同じ方向を向いていないため、灯台のように、ビームが地球と交差するときに、1回転あたり1回(または一部のパルサーでは1回転あたり2回)の放射しか見えません。私たちは現在、天の川銀河と近くの銀河内に約3000個のパルサーを知っています。パルサーの大部分は電波望遠鏡を用いて観測されますが、最もエネルギーの高いパルサーのいくつかは、X線およびガンマ線でも観測されます。

一般に、天体の光度は、天体が発するすべての光の総和と見なされます。しかし、光度を、天体が時間の経過とともに放出または喪失するあらゆる形態のエネルギーの量と考えることもできます。物体の回転が遅くなると、その回転運動エネルギーは減少します。エネルギー保存則によって、運動エネルギーは何らかの形で散逸または放射されなければなりません。したがって、天体の回転エネルギーが減少する割合は、天体が放射するエネルギー、つまり「スピンドアウン光度」と同じです。パルサーが高速回転していることは、蓄積された運動エネルギーの巨大な貯蔵庫があることを意味します。毎秒60回の回転をしているパルサーが、私たちの太陽と同じ電磁放射をしてエネルギーを失うとすると、約6億年分の長さに相当します。地球上の人間が消費する現在のエネルギーに換算すると、約100垓(10^{22})年分に相当します。しかし、パルサーの回転速度の変化を観測すると、太陽よりもはるかに速くエネルギーを失っており、しかも可視光はほとんどないことがわかります。その放射エネルギーはどのような形で失われているのでしょうか?かなりの部分

が重力波放射であるかどうかを知りたいと私たちは考えています。

PSR J0537-6910として知られるパルサーは、既知のパルサーと比較して、最も珍しい標本あるいは外れ値の1つです。この名前は、天文学者が使用する天空の「赤道」座標*に基づいており、赤経は05時37分、赤緯は-69度10分角を意味しています。このパルサーは、天の川銀河を周回する小さな「伴銀河」である大マゼラン星雲*にあります。PSR J0537-6910は、他の既知のパルサーよりも速くエネルギーを失い、その「スピンドアウン光度」は、約 5×10^{31} ワット、つまり太陽光度の約100,000倍です。その驚異的な光度に加えて、PSR J0537-6910は多くのグリッチ活動をしているように見えます。パルサーグリッチとは、パルサーが回転速度を突然わずかに増加させる現象です。

他のほとんどのパルサーとは異なり、PSR J0537-6910は電波のパルスでは観測されず、X線でのみ観測されています。X線は地球の大気を透過しないので、宇宙にある望遠鏡だけがX線を検出できます。このパルサーは、ロッシX線天文衛星(Rossi X-ray Timing Explorer, RXTE)によって発見され、その後1996年から2012年の間(RXTEの運用が終了するまで)継続して観測されました。2017年には、中性子星内部構造探査機(Neutron star Interior Composition Explorer, NICER)と呼ばれるX線望遠鏡が国際宇宙ステーションに設置されました。PSR J0537-6910は、その興味深い性質により、NICERの観測計画での主要なターゲットになりました。RXTEとNICERの観測は、このパルサーに頻繁にグリッチ活動があることを明らかにすると共に、この星がグリッチイベントの間でどのようにエネルギーを失っているのかについての興味深い事実を見つけました。ブレーキング指標と呼ばれるパラメータは、パルサーがどのように回転速度を遅くするかを示します。回転速度を遅くするエネルギー損失メカニズムの違いに応じて、ブレーキング指標は異なる値になります。特にこの指標が5と7の値は、重力波放出の2つの異なるモードに関係していると予想されます。図1に示したNICERとRXTEの観測は、グリッチ間隔が長い場合、ブレーキング指標がこれらの値のいずれかに向かう傾向があることを示して

います。つまり、重力波の放出がパルサー回転の減速のもっともらしい説明です。

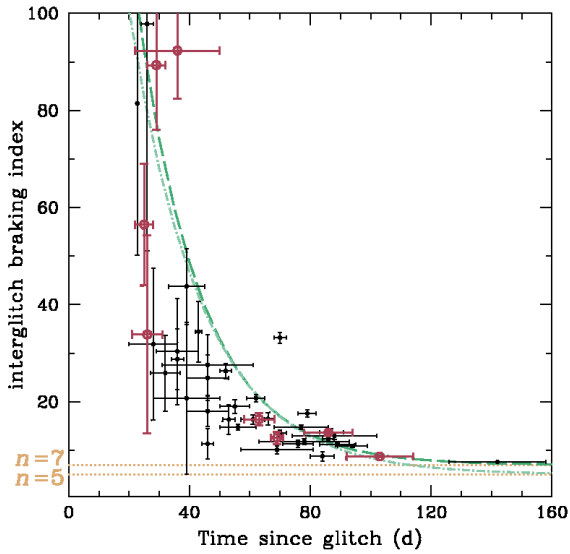


図 1: X 線観測で得られたパルサー PSR J0537-6910 のブレーキング指標を、グリッチ間の間隔を横軸にして示す。赤と黒の点はそれぞれ NICER と RXTE による観測値である。グリッチ間が大きくなると、ブレーキング指数は 5 または 7 の値に近づいていくことがわかる。

この天体の例外的な性質を考慮して、LIGO, Virgo, および KAGRA のグループは、NICER チームと協力して、このパルサーからの連続重力波 * 信号の探査をしました。LIGO および Virgo での最新データ (O2 および O3 観測期) の中で、2017 年以降の PSRJ0537-6910 の NICER による観測と重複する期間のものを利用しました。NICER のデータは、グリッチの間の、パルサーの回転速度を正確に追跡します。このデータを用い、重力波のデータを合わせて積分することによって、弱い信号に対して最も感度の高い探査が可能になります。今回の探査では、重力波の放出について 2 つの異なるモデルを想定しました。1 つはパルサーが赤道に関して非対称であり (たとえば「山」があり)、星の自転周波数の 2 倍の周波数で重力波を放出する、というもの (これは、ブレーキング指標が 5 の値になるメカニズム)。もう 1 つは、星の自転周波数の 1 倍と 2 倍の両方で重力波が放出される、というものです。重力波観測に加えて、私たちはこのパルサーが引き起こした最も最近のグリッチでの X 線測定値も示しました。

このパルサーからの重力波信号の証拠は見つかりませんでしたが、この結果は、PSRJ0537-6910 に関するさらに興味深い情報を示します。図 2 は、私たちの

データに基づく星の楕円率の確率分布を示しています。ここで、楕円率とは、星の赤道の非対称度を星全体の半径と比較した値です (大まかに言えば山の高さに相当します)。この確率分布は、楕円率がゼロであることと矛盾しませんが、わずかにゼロではない値である可能性も示しています。そのため、「上限値」を議論することができるようになります。95 % の信頼度で、上限値が 0.00003 をわずかに上回ることから、95 % の確率で、楕円率がこの値を下回っていると考えられます。このことから、山の高さが数十 cm 未満であると大まかに解釈できます。160,000 光年 (1.5×10^{18} km) 離れている星に対する制限としては、とても印象的な値です。この上限値は、この星のスピンドウン光度がすべて重力波として放出された場合に予想される値 (スピンドウン限界) を下回っています。この上限値を重力波放出によるエネルギーに換算すると、星のスピンドウン光度の約 14 % 未満にすぎません。つまり、スピンドウンのエネルギー損失の約 86 % 以上は他のメカニズムによるものだった、ということになります。たとえば、パルサーの驚異的な磁場は、磁気双極子放射として知られるメカニズムを介し、荷電粒子を加速してパルサー星雲を形成するので、そのエネルギーかもしれません。ただし、重力波放出とは別のメカニズムが主な放出源としてはたらいっている可能性も残されています。星の表面を移動する物質波は、自転周波数の約 4/3 の重力波を生成します。これらの物質波は今回の探査では検出されませんが、ブレーキング指標は 7 になるものです。

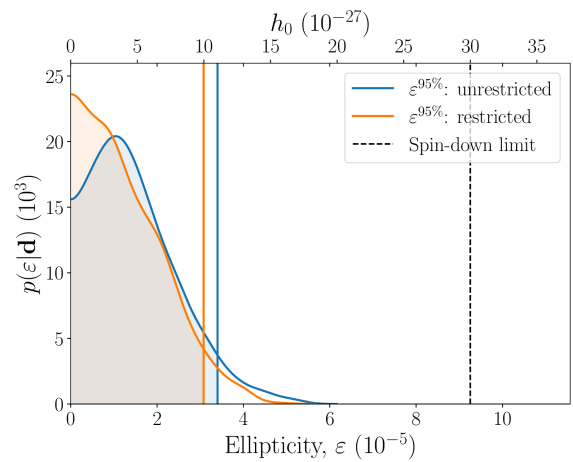


図 2: O2 および O3 観測期の LIGO および Virgo データに基づく、PSRJ0537-6910 の楕円率の確率分布。2 組の曲線は、パルサーを取り巻く星雲の X 線観測に基づいて、地球に対するパルサーの向きについて異なる仮定を行ったときに得られた分布を表しています。どちらの場合も非常によく似た結果が得られている。

より詳しい情報の取得先

- ウェブサイト:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

www.nasa.gov/nicer



- 論文は[こちら](#).

用語集

- 中性子星 (Neutron Star): 太陽の質量の 10 倍から 25 倍の質量を持つ星が超新星爆発を起こした残骸。典型的な中性子星の質量は太陽質量の約 1~2 倍、半径は 10~15 キロメートルで、これまでに発見された中で最もコンパクトな天体の 1 つ。
- 赤道座標 (Equatorial coordinates): 天文学者が用いる天体の位置を示す座標系の 1 つ。赤経と赤緯によって表され、赤緯 0° は天の赤道、赤緯 90° は天の北極、赤緯 -90° は天の南極である。赤経の原点は春分点の方向である。
- 大マゼラン雲 (Large Magellanic Cloud): 天の川銀河から 5 万 [パーセク](#) の距離にある矮小銀河。大マゼラン雲・小マゼラン雲とも南半球では肉眼で観測できる。
- 連続重力波 (Continuous gravitational wave): ブラックホール合体では、周波数が上昇するごく短時間の重力波信号になるが、それとは対照的に、常に存在し、ほぼ一定の周波数の重力波信号のこと。詳細については、[ここ](#)を参照のこと。