

# 中性子星連星ができるまで

山 岡 均

〈九州大学教養部 〒 810 福岡市中央区六本松 4-2-1〉

茂 山 俊 和

〈東京大学理学部 〒 113 東京都文京区弥生 2-11-16〉

中性子星のうち、磁場を持っていて高速で自転しているものはパルサーとして観測される。そのパルスの間隔は高精度で一定なので、パルサーは“宇宙に浮かぶ精密時計”として有名であるが、この間隔が短期間に大きく変動して見えるものが見つかった。この変わりもののパルサー＝連星パルサーにスポットを当て、このような天体ができるまで、またその終末について考えてみた。

## 0. 話はパルサーから始まる

中性子星は、大質量星の進化の最終段階で超新星爆発が起こり、星の中心部がつぶれて超高密度になった結果できた、半径 10 km ほどの小さいサイズの天体である。このとき、星の中心部分の磁場や角運動量を保存したまま収縮するので、生まれ出た中性子星は、強い磁場を持ち、高速で自転する天体となる。この磁場の働きによって、中性子星の自転周期を 1 周期とするパルス電波が発せられる。パルス電波がちょうど地球の方角を向いていれば、中性子星は世に名高いパルサーとして観測される。

パルサーのパルス周期、すなわち中性子星の自転周期は非常に安定している。現在、原子の出す放射によって定義されている時間の標準を、パルサーによって定義し直そうという研究もなされているほどだ。ところが、パルサーのなかで、パルス周期が奇妙な変化を示すものがあることがわかってきた。これがこの話の主役、連星パルサーである。

## 1. 連星パルサーの発見

この奇妙なパルサーが発見されたのは、1974 年にさかのぼる。カリブ海に浮かぶプエルトリコ島の、谷間を利用して作られたアレシボ 300 m 電波望遠鏡によって発見されたそのパルサーは、PSR 1913+16 と名づけられた。赤経 19 時 13 分、赤緯 +16 度にあるパルサーという意味である。ちょうどわし座の北端、夏の天の川のまん中にあたる。

パルサーが見つかる、まずそのパルス周期が測定される。発見後間もなく、このパルサーのパルス周期が今まで知られていないような変化をしていることがわかった。パルスの周期が一定でなく、5 分間に 1 周期の 10 万分の 1 ほども変化するのである。しかも、パルス周期が長くなったり短くなったりという変動であることもわかった。既知のパルサーでは、パルス周期は徐々に長くなっていくのだが、1 周期の 10 万分の 1 も変動するには 1 年以上の時間が必要である。もちろんそのくらい変動が少ないのでなければ、パルサーを時間の標準にしようと考えたりはしないだろう。この PSR 1913+16 からのパルスは、型破りのものなのだ。

Hitoshi Yamaoka, Toshikazu Shigeyama: Making of the Double Neutron Star Systems

くわしく観測するうち、このパルス周期の変動が周期的で、7.752時間ごとに長くなったり短くなったりをくりかえしていることがわかった。このような変動を中性子星の自転周期の変動と考えるのは無理がある。これほど大きな変動、しかも周期的変化を起こすような原因を考えるのは難しいからだ。したがって、この変動はパルサー自身の変化ではなく、パルサーがもうひとつの天体の周りを公転しているために起こる見かけの変化ではないかと考えられた。公転運動でパルサーがわれわれから遠ざかるときには、ドップラー効果でパルス周期は長くなり、逆に近づくときには短くなるのが原因だと考えるのである。そうすると、観測された変動がうまく説明できる。こうして、PSR 1913+16 は、公転周期 7.752 時間、離心率 0.617127±0.000003 の楕円軌道を描く連星系の一員であることがわかった<sup>1)</sup>。

## 2. 連星パルサーの観測

前の章の最後に示した離心率の値に注目してほしい。非常に精密な値が求められていることがわかるだろう。これは、この連星系がパルサーという精密時計を持っているために得ることができるものだ。この精密時計のおかげで、他の恒星などでは測ることができないさまざまな物理量を精密に測定できるのである。

ドップラー効果の観測によって求められるのは、上に挙げた軌道周期  $P$  と、軌道運動の速度のうちわれわれに向かう（もしくは遠ざかる）方向＝視線方向の成分とである。これから直接、離心率  $e$  は求めることができるが、その他の量、たとえば軌道長半径  $a$  や両星の質量などは求められない。しかしこれらと、軌道面の法線と視線との角度  $i$  との組み合わせの量である質量関数 (mass function) が得られる。

この事情は普通の連星系でも同じである。ドップラー効果で恒星の吸収線の波長が移動するのを観測して視線速度を求め、質量関数を求める。さ

らに、公転軌道が天球面上の移動として観測できるものや食を起こすものについては  $i$  を推定でき、これから星の質量を求めることができる。しかし、この  $i$  の推定はそれほど精度良くはできないので、恒星の質量の測定は難しいのである。

ところが PSR 1913+16 の場合は、もっと良い決定方法が適用できる。水星の近日点移動で有名な、一般相対論的效果を用いるのである。連星の近星点移動の量は、両星の質量の和の  $2/3$  乗に比例し、軌道周期の  $5/3$  乗に比例する。水星の近日点移動の量は 100 年あたり  $43''$  と非常に小さいものであるが、水星の軌道周期 88 日にくらべて PSR 1913+16 系の軌道周期は 270 倍以上短く、近星点移動の量は大きいと推定できる。4 年間の観測によって、この系の近星点は 1 年につき  $4.226''$  移動しているのがわかった。この観測から、両星の質量の和が  $2.8278 \pm 0.0007$  太陽質量であると決められた<sup>2)</sup>。

さらに重力場による赤方偏移の結果起こるパルス周期の変動を考えると、伴星の質量が決定でき、パルサーの質量も求まる。両星の質量は、現在、次のように測られている。

$$\begin{aligned} \text{パルサーの質量} &= 1.4421 \pm 0.0012 M_{\odot} \\ \text{伴星の質量} &= 1.3875 \pm 0.0012 M_{\odot} \\ & \quad (M_{\odot} \text{は太陽の質量}) \end{aligned}$$

また、連星系の軌道長半径は 2.80 太陽半径、すなわち約 200 万 km と、非常に小さい系である。この伴星は、光学対応天体が見つからないほど暗いこと、また軌道半径から、質量の割に小さい天体であることがわかり、やはり主星（パルサー）と同じく中性子星であると考えられている。つまり、PSR 1913+16 系は中性子星同士の連星なのである<sup>3)</sup>。

## 3. 次々見つかる連星パルサー

連星系をなしているパルサーは PSR 1913+16 だけではなく、いくつか見つかっている。しかし多くの連星パルサーは、軌道周期が長く、離心率



が小さいものである。伴星も、太陽より軽い普通の星である場合が多い。軌道が大きく離心率が小さいと、近星点移動の量は小さくなって測定するのが難しいため、PSR 1913+16系でなされたほど高精度の質量決定はできない。

つい最近(1990年末)、やはりアレシボの300m電波望遠鏡によって、連星パルサー PSR 1534+12が発見された<sup>4)</sup>。このパルサーはへび座の頭のところに位置していて、銀河面からは離れたところにある。さっそく求められた軌道周期は10.097時間で、離心率は0.274と大きかった。したがって、PSR 1913+16の系でなされたのと同じ、高精度のさまざまな観測が可能である。短期間の観測で、近星点移動の量が測られ、暫定的に次の質量が求められている。

パルサーの質量 =  $1.32 \pm 0.03 M_{\odot}$

伴星の質量 =  $1.36 \pm 0.03 M_{\odot}$

この系の軌道長半径も小さく、この伴星は中性子星と考えてよいだろう。これからのくわしい観測が楽しみである。

パルサーの伴星がもっと軽い例も発見された。最近新聞紙上を賑わせた「パルサーの惑星」である。最初に報告されたもの<sup>5)</sup>(1月号の油井氏の記事<sup>6)</sup>)は、残念ながら計算間違いで、実際に惑星は存在しないという訂正記事が *Nature* 誌に掲載された<sup>7)</sup>(6月号の工藤氏の記事参照<sup>8)</sup>)。しかし今年1月、別のパルサー PSR 1257+12のまわりに惑星があるという報告がなされた<sup>9,10)</sup>。それによると、このパルサーの周囲には最低2つの惑星が存在していて、その重さは地球の2.8倍と3.4倍、軌道はそれぞれ半径0.47 A.U.と0.36 A.U.の円軌道で、おのおの98.2日、66.6日の周期でパルサーのまわりを公転しているそうである。

パルサーに惑星があると考えた人はあまりいなかった。パルサー(中性子星)は超新星爆発で形成されるので、もし超新星になる星が惑星を持っていたとしても、超新星爆発にまきこまれてしまって、あとかたもなくなるだろうからである。爆

発後に新たに惑星を形成するというシナリオなどが今考えられはじめたところである。それにしても、地球の数倍という(天文学的には)軽い天体の存在までわかるのだから、パルサーという精密時計の威力が絶大であるのがおわかりだろう。

#### 4. 中性子星連星ができるまで

さて、中性子星連星が形成されるときのことを考えてみよう。中性子星は、大質量星が進化した末に起こす超新星爆発によって誕生するのであるから、この系は、2つの大質量星がお互いのまわりを公転しているような系として生まれ、2回の超新星爆発を経験した結果できたと考えられることができる(図1)。

2つの大質量星のうち、重いもののほうが進化が速い。したがって、もう一方よりも先に超新星となり、中性子星が1つできる。その後、2つめの大質量星は膨張して赤色巨星となるが、ある半径(ロッシュ半径という)よりも大きくなろうと

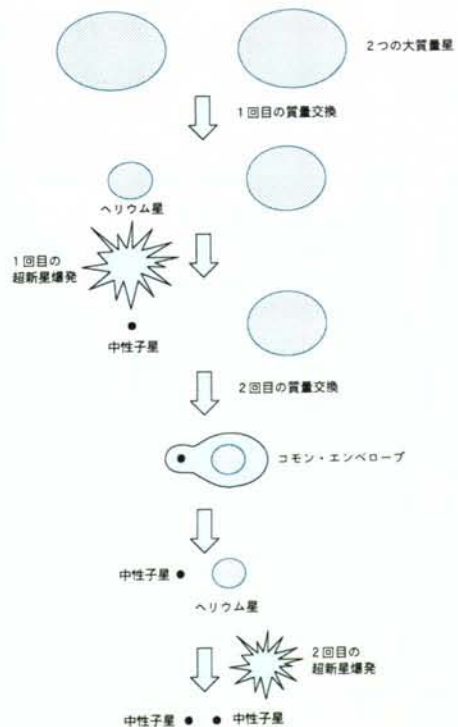


図1 大質量連星から中性子星連星ができるまで

すると、中性子星との間に働く潮汐力によって赤色巨星の表面がはがされて、中性子星へと流れ込んでいく。はがされた物質の一部は中性子星に降りつもるが、大部分は中性子星に落ちることができず、2星をおおうようになると考えられている。これをコモン・エンベロープ (common envelope, 共通外層という意味) という。コモン・エンベロープの状態の連星系のふるまいについてはまだよくわかっていないが、定性的に考えると、2星はコモン・エンベロープのなかを公転するのだから、その軌道運動のエネルギーはエンベロープの物質との摩擦によって減少し、軌道は小さくなり、離心率は0に近づくであろう。この状況は赤色巨星の水素外層がすべてはがされるまで続く。水素外層がほとんどなくなると、星は収縮して、ロッシュ半径よりも小さくなり、外層の流れ出しは起こらなくなる。つまり、2回目の超新星爆発の直前、系は1つの中性子星と1つのヘリウム星 (大質量星が、水素に富む外層をはぎとられて、ヘリウムでできた芯だけになったもの) とが円軌道を描いて回り回っていると考えられる。

PSR 1913+16 や PSR 1534+12 の各星のような質量の中性子星を生むためには、このヘリウム星の質量は  $6M_{\odot}$  程度でなければならない。もっと軽いヘリウム星からはもっと軽い中性子星しかできず、逆にもっと重いヘリウム星が爆発すると、もっと重い中性子星もしくはブラックホールができるからだ。もちろん、もう一方の中性子星の質量は、観測されているように  $1.4M_{\odot}$  程度である。すなわち、2回目の超新星爆発の直前、この系は、 $6M_{\odot}$  のヘリウム星と  $1.4M_{\odot}$  の中性子星のペアであったはずである。

このような系で超新星爆発が起こると、ちょっと困ったことになる。超新星爆発が球対称であったとすると、系が壊れてしまって両星がめいめいの方向に飛んでいってしまうのである。この系で超新星爆発が起こると、系の質量が  $7.4M_{\odot}$  から  $2.8M_{\odot}$  に瞬時にして減少する。系の質量が突然半

分以下になると、系の重力エネルギーが絶対値で小さくなり、軌道運動のエネルギーのほうが勝って、2つの星がバラバラの方向に飛んでいってしまう。つまり今観測されるような中性子星連星はできない。

そこで、超新星爆発が球対称でなく、新しく誕生した中性子星になんらかの運動が与えられたと考えなければならなくなる。われわれの研究によると、PSR 1913+16 や PSR 1534+12 のような系を作るためには、200~400 km/s の速度が新たに生まれる中性子星に付け加えられなければならないことがわかった<sup>10)</sup>。この速度は、単独のパルサーで観測されている平均の速度 (100 km/s 程度) よりもかなり大きい。うまい方向にうまい “kick” が働いて、このような系ができたのであろう。“kick” が小さかった場合、または “kick” の大きさは適当であったがあらぬ方向を向いていた場合には、連星系

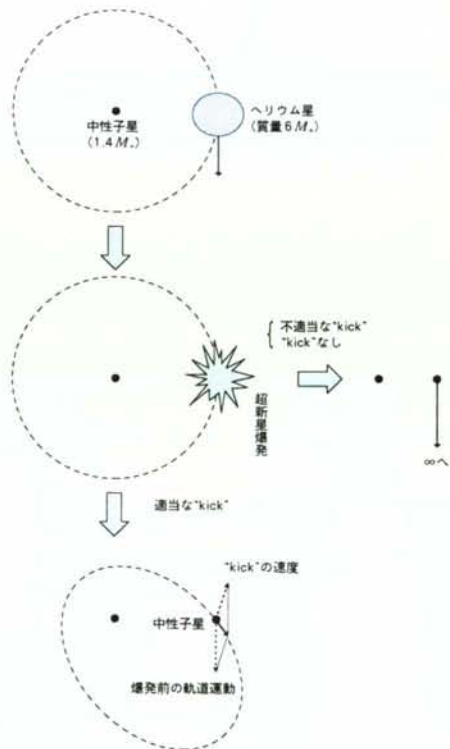


図2 ヘリウム星-中性子星系の運命



は壊れてしまう(図2)。これは、大質量のヘリウム星の50%以上が連星系をなしているのに、中性子星連星は数えるほどしか見つかっていないことに対応しているのだろうと考えられる。

大質量星が超新星爆発を起こすメカニズム、つまり重力崩壊が爆発に転ずる機構については、まだよくわかっていない。すなわち、“kick”の成因については何とも言えない。しかし、1054年の超新星爆発によってできたカニ星雲の中にあるパルサーが、星雲の物質をかき分けながら移動しているという観測から、“kick”が実際に存在すると考えるのは自然である。

また、“kick”によって中性子星連星ができたとして、この連星系の重心は数百 km/s の速度を得る。つまり、この連星系は数百 km/s のスピードで飛び去っていくのである。中性子星連星の母体である大質量星同士の連星は、われわれの銀河の disk の部分で生まれたので、超新星爆発時には disk 内にあったはずだが、PSR 1534+12 は銀河面からかなり離れたところで見つかっている。これは、この系が大きな速度を得て、銀河面から飛び出す方向に進んでいると考えるところとつじつまが合う。

しかし、この過程で作られたと考えると困ることになる中性子星連星もある。球状星団 M 15 の中に発見された PSR 2127+11 C がそうである。系の重心に数百 km/s の速度が与えられてしまうと、この系は球状星団の重力をふりきって、どこかへ飛んでいってしまうからである。そこで、球状星団中の中性子星連星は、中性子星と白色矮星のペアが最初にあって、そこにもう1つの中性子星が軌道内に入り込むほど近くを通りかかって、白色矮星がはじき出されてきたという説が提唱されている。銀河面内では恒星(系)同士の衝突はめったに起こらないが、星の密度が高い球状星団の中ではこれが起こりうると思うのである。いずれにしても、なかなかひとすじなわけでは中性子星連星は生まれてこないのがおわかりだろう。

## 5. 中性子星連星と重力波

2章で、連星パルサーの観測から両星の質量を求める話の時に一般相対性理論が登場したが、中性子星連星ではもう1つ、興味ある一般相対論的現象がある。それが、重力波放出である。

一般相対論によると、2つの星の衝突や連星の公転など、非球対称の運動が起こると、重力波が放出される。連星系の公転によって放出される重力波の強度は、両星の質量の和の5乗に比例し、両星間の距離の5乗に反比例する。今話題にしている中性子星同士の近接連星系は、軌道が小さく、星の質量も大きいので、普通の連星系よりも強い重力波を放出しているはずである。しかし PSR 1913+16 から放出される重力波は、現存する地上の重力波検出器ではとてもとらえることができないほど弱いものだ。実際、現在まで多くの努力がなされているが、どんな機構で放出される重力波についても、直接にとらえることには誰もまだ成功していない。

ところで、重力波を放出すると、重力波という形でエネルギーを放射していくのだから、系の公転運動のエネルギーを失い、公転速度が小さくなる。すると、星に働く重力のほうが遠心力より大きくなって、公転軌道は小さくなる。その結果、公転周期は短くなることになる。

ここで、再び連星パルサーが注目される。パルサーという正確な時計を積んでいるため、わずかな軌道変化でも、とらえることができるわけである。しかも、中性子星連星ならば、軌道の変化も大きい。PSR 1913+16 では、発見から4年の間に、公転周期が10000分の4秒短くなったと観測された。この値は、2章で求めた軌道の大きさと両星の質量から一般相対論を用いて計算した量とぴったり一致していた<sup>2)</sup>。

こうして、間接的ながら、一般相対論が予言する重力波が実際に存在することが明らかになった。つまり、中性子星連星によって、一般相対論

はより強固になったのである。

## 6. 中性子星連星のその後

さて、中性子星連星は、重力波放出によって軌道半径が小さくなっていくから、将来的には両星がどんどん近づいていくことになる。今のペースで公転周期が短くなるとすると、(7.752 時間)/(4/10000 秒)×4 年~3×10<sup>8</sup>年ほどで周期が0 になってしまう、つまり両星がくっついてしまうのである。実際には、軌道が楕円であるため近星点付近ではより強い重力波放出が起こること、将来軌道半径が小さくなったときには重力波放出が強くなることを考えると、2つの星が接触するまでにかかる時間は、上の推定よりも短いであろう。すなわち、数億年という短い時間——宇宙の年齢(約150 億年)にくらべて——でこの2星は接触することになる。

それでは、中性子星同士が接触するほど近づいたときには、どのようなことが起こるかを考えてみよう。2星間の距離が近づいて、中性子星の半径の数十倍ほどの距離になると、両星の表面に強い潮汐力が働くようになる。さらに両星が接近すると、潮汐力はより強くなって、ついにはどちらの星も形を維持できなくなり、分解してしまうことになる。最終的に、2つの中性子星が、合体して1つの天体になる。PSR 1913+16系では、2つの中性子星の物質全部が合体するとすれば、2.83M<sub>⊙</sub>の天体ができることになる。これは、中性子星の最大質量よりも大きいので、たぶんブラックホールが形成されるであろう。最近話題になっている、γ線バースターの等方的出現は、この中性子星の合体が宇宙論的な距離(つまり遠方)で起きているものが観測にかかったのだという説もある。中性子星の合体は注目を集めつつある現象である。

ところで、この中性子星の合体は、明らかに非球対称な現象であり、強い重力波放出が見込まれる。連星の公転による重力波と違いバースト的だ

が、公転のものにくらべてけた違いに強いものだ。もし1億光年彼方の銀河で中性子星の合体が起こったとしても、(今すぐは無理だが)来世紀初頭に作られるであろう“重力波望遠鏡”で検出できるくらい強い。1億光年以内で、中性子星の合体は年に1回程度起きると推定されている<sup>11)</sup>ので、この重力波バーストは充分観測され得る。

中性子星連星の合体は、重力波を直接に観測できる最初の現象になるかもしれない。重力波天文学という面からも、中性子星連星はこれからの注目の的になるであろう。

中性子星連星について考えることは、恒星の進化という古くから研究されている分野から、重力波天文学という未開拓な分野まで、広範な興味を満たしてくれる。パルサーという精密時計は、これからもいろいろな観点からのアプローチで利用されていくことだろう。

## 参 考 文 献

- 1) Hulse, R.A. and Taylor, J.H., 1975, *Astrophys. J. Letters.*, **195**, L51.
- 2) Taylor, J.H. and Weisberg, J.M., 1982, *Astrophys. J.*, **253**, 908.
- 3) Taylor, J.H., 1992, in *NATO ARW, X-ray Binaries and the Formation of Binary and Millisecond Radio Pulsars*, ed. E.P.J. van den Heuvel (Kluwer), in press.
- 4) Wolszczan, A., 1991, *Nature*, **350**, 688.
- 5) Bailes, M. *et al.*, 1991, *Nature*, **352**, 311.
- 6) 油井正生, 1992, 天文月報, **85**, 26.
- 7) Lyne, A.G. and Bailes, M., 1992, *Nature*, **355**, 213.
- 8) 工藤哲洋, 1992, 天文月報, **85**, 6.
- 9) Wolszczan, A. and Frail, D.A., 1992, *Nature*, **355**, 145.
- 10) Yamaoka, H. *et al.*, 1992, submitted to *Astron. Astrophys.*
- 11) 中村卓史, 藤本眞克, 1990, 日本物理学会誌, **45**, 2.