

X線連星からミリ秒パルサーへ

浅井和美

〈理化学研究所 〒351-01 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: asai@cricket.riken.go.jp

単独の大質量星が超新星爆発を起こして中性子星を作った場合、その中性子星は電波パルサーとして輝き、やがて回転速度が遅くなってパルサーとしての死を向かえる。一方、連星系の一員として生まれた中性子星は、相手の星からの質量降着を受け、X線源として輝く。従来、これら二種類の中性子星は全く独立の進化の道筋を歩むと考えられてきた。ところが1980年代になって、新しい種類の電波パルサーであるミリ秒パルサーの発見が相次いだ。この発見後まもなく、X線連星が進化の果てに電波源であるミリ秒パルサーになるというシナリオが提出された。このシナリオは、ともに中性子星を含むX線源と電波源を見事に結び付ける一方、いくつかの問題点を含んでいる。ここでは、その一つである「誕生率の問題」を中心にその解決策も含めて紹介する。

1. 電波パルサー

電波パルサーは、強い磁場（典型的には表面で 10^{12} ガウス）を持ち、高速で自転する（数秒以下）中性子星である。このような中性子星は、大質量星が進化の果てに超新星爆発を起こして生成されると考えられている。生まれて間もない中性子星は、カニパルサーに代表されるように、電波から γ 線におよぶ幅広い波長域で強い輻射をだす。図1に、電波パルサー（中性子星）の自転周期と表面磁場の関係を示す。通常電波パルサーは、このダイアグラム上で時間とともに矢印（実線）のような道筋を通過して進化すると考えられている。これは、電波パルサーが輻射のエネルギー源として中性子星の自転エネルギーを使っているためである。したがって、その自転周期は時間とともに長くなり、 10^6 - 7 年たつて周期が数秒を越えると、その回転エネルギーを有効に輻射に変換できなくなって、電波パルサーとしての死を迎えると考えられている。このような電波パルサーが我々の銀河系中には約600個程見つかっている。

2. X線連星

単独の中性子星が電波パルサーとして観測される（ことがある）のに対し、中性子星が近接連星系の一員である場合、X線源として観測されることが多い。銀河系内には明るいX線源が約百数十個程あり、その多くは恒星と中性子星との近接連星系である。X線は、恒星の重力圏からあふれ出したガスが中性子星に落ち込む時、その強い重力場で1千万度以上にまで加熱されたプラズマから放射される。このようなX線連星は2種類に大別することができる。一方は、「質量が大きい若い星」と「強い磁場をもった中性子星」からなる「高質量X線連星」、もう一方は、「質量が小さく年老いた星」と「磁場をほとんどもたない中性子星」からなる「低質量X線連星」である。高質量X線連星では、中性子星の強い磁場のために降着物質は磁極に集中する。このため、磁軸と自転軸が一致していなければ、磁極が見え隠れしてX線パルスが観測されることになる。一方、低質量X線連星では、X線パルスは観測されていない。これは、中性子星の磁場が弱いために降着物質が磁極に集

申しないからだと考えられている。

X線連星は、もともとの連星系のうちの片方の星が超新星爆発をおこして中性子星になり形成されると考えられる。しかし、進化が早いのは重い星であり、先に超新星爆発を起こすのも重い星である。一般に、連星系はその全質量の半分以上を失うと崩壊してしまうことが知られている。したがって、先に進化した重い星が超新星爆発を起こした場合、中性子星が作られたとしても、連星系が壊れてしまうことになる。X線連星のもとになるような近接連星系の場合、より重い星が進化をして赤色巨星になると、その外層の大部分がもう一方の星へ移動してしまい、超新星爆発を起こす頃には、質量比が逆転してしているものと考えられている。従って、系が壊れることなく、高質量X線連星が誕生することになる。では、一方が太陽質量以下の低質量星で、もう一方が太陽質量の数倍以上であれば、低質量X線連星になるのだろうか？ この場合、低質量星が先に進化した大質量星の外層をそっくり受け取ったとすると、低質量X線連星ではなく高質量X線連星ができてしまう。一方、大質量星の外層が系から逃げて行って低質量星が低質量のままだとすると超新星爆発で系が壊れてしまう。従って、低質量X線連星の

誕生過程にはまだ定説がないが、星の密度が極端に高い球状星団内では、単独で生まれた中性子星が近接遭遇や三体遭遇によって伴星を捕獲して低質量X線連星が形成されると考えられている。

3. ミリ秒パルサー

1980年代に入って、新しい種類の電波パルサーの発見が相次いだ。これらのパルサーは、弱い磁場とミリ秒に達する短い自転周期を持ち、この自転周期の短さからミリ秒パルサーと呼ばれている。ミリ秒パルサーには、連星系をなすものや球状星団中に存在するものが多く、高銀緯にも存在するという特徴をもつ。このミリ秒パルサーは、弱い磁場を持つことと、球状星団内に多く存在していることから、非常に古い天体であると考えられている。

しかし、従来の進化のシナリオでは、古いことは遅い自転速度を意味し、ミリ秒という自転周期は説明できない。そこで、図1の矢印(点線)のように、古いあるいは死を迎えた電波パルサーの自転速度が何等かのメカニズムで増大してミリ秒パルサーが誕生したと考えられるようになった。この自転の高速化のメカニズムとして現在提唱されているのが質量降着である。つまり、年老いて

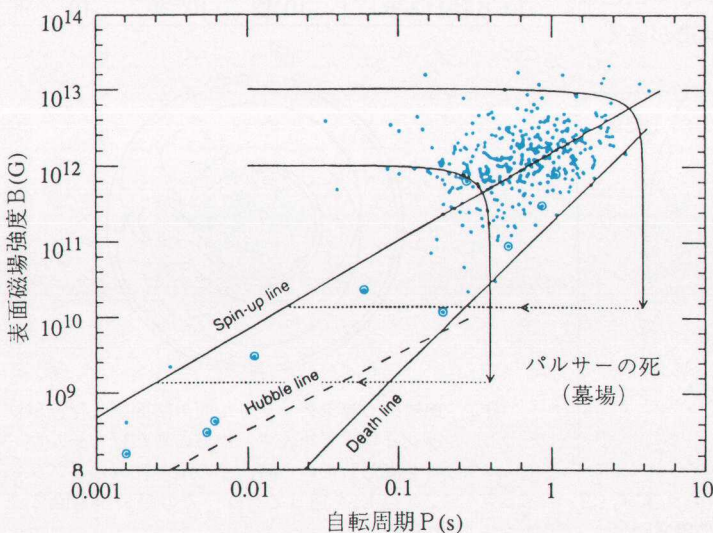


図1 電波パルサーの自転周期と表面磁場強度の関係。●が単独の電波パルサーを表し、●が連星系に属する電波パルサーを表す。Death lineは、中性子星が電波パルサーとしての死を向かえる境界線を表し、Hubble lineは、パルサーの寿命が宇宙年齢(〜10¹⁰年)に等しくなる境界線を示す。また、spin-up lineは、質量降着によって到達可能な自転速度の上限を表す¹⁾。

自転が遅くなったかつての電波パルサーが連星系の一員の場合、相手の星からの質量降着により中性子星に角運動量が与えられ、その自転速度が増大するというのである。たとえば、中性子星表面近傍でのケプラー運動を考えると、その軌道周期は0.1ミリ秒、従って十分な量の物質(～0.1 M_☉)が中性子星に降着すれば、中性子星の自転速度はミリ秒にまで高められる。このことから、連星系の一員である中性子星が質量降着を受けている系、つまり X 線連星はその進化の果てに電波源であるミリ秒パルサーになるというシナリオが提出された。ミリ秒パルサーは再び電波パルサーとして蘇ったという意味で、「リサイクルパルサー」と呼ばれることもある。

連星系をなしているミリ秒パルサーの相手の星は、そのほとんどが 2 M_☉以下の白色矮星あるいは中性子星である。この相手の星の種類によって、連星ミリ秒パルサーは 2 つに大きく分けられる。一つは、中性子星あるいは比較的質量の大きい(0.6 M_☉以上)白色矮星との連星系であり、その軌道は楕円で 0.1-10 日程度の周期のものが多い(図 2: PSR 1913+16 型)。これは、高質量 X 線連星中の大質量星が進化して、白色矮星あるいは中性子星になったのものと考えられている。

もう一つの種類は、比較的質量の小さい白色矮星との連星系であり、その軌道は円軌道が多く、

その周期は 1-1000 日と長い(図 2: PSR 1953+29 型)。これは、低質量 X 線連星が進化したものと考えられている。

4. 誕生率の問題

X 線連星がミリ秒パルサーへと進化するならば、進化の流れが定常状態に達していると考えられている銀河系では、両者の誕生率は等しくなるはずである。誕生率は、その星の総数と寿命から見積もることができる。X 線の場合、その大きな透過力から銀河系の中をくまなく見渡すことができるので、ほとんどすべての X 線源がすでに観測されていると考えられる。したがって、その総数は現在知られている X 線源の数に等しく、約百数十個(低質量 X 線連星は約 100 個)である。またその寿命は、標準的な質量移動の量から推定される(10⁹年)。一方、ミリ秒パルサーの総数は、Kulkarni と Narayan によって観測結果から様々な選択効果を考慮して見積もられた(10⁵個)。その寿命は自転周期の変化率 P/2 p から 10¹⁰年と見積もられる。

表 1 問題とされている低質量 X 線連星とミリ秒パルサーの誕生率

	数	寿命	誕生率
低質量 X 線連星	100 個	10 ⁹ 年	10 ⁻⁷ /年
ミリ秒パルサー	10 ⁵ 個	10 ¹⁰ 年	10 ⁻⁵ /年

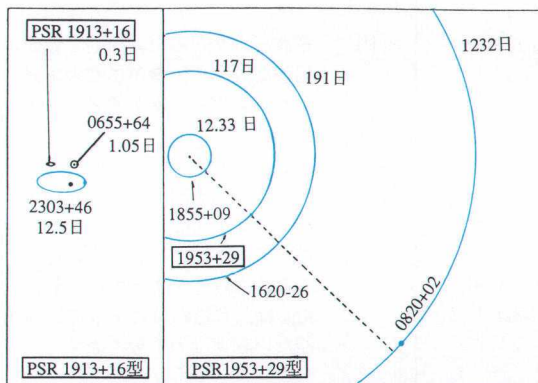


図 2 ミリ秒パルサーに見られる 2 種類のタイプ、PSR 1913+16 型と PSR 1953+29 型の模式図¹⁾。

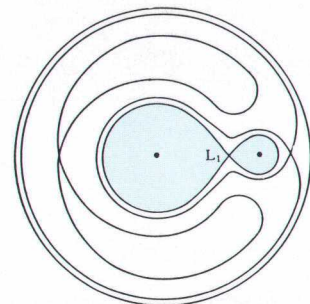


図 3 連星系の等ポテンシャル面の断面図。青色がロッシュローブを表す。片方の星がロッシュローブを満たしている時、その星の物質はラグランジュ点 L1 を通ってもう一方の星の重力圏に流れ込む。

これらの結果をまとめると、表1に示すように、低質量 X 線連星の誕生率に関しては、ミリ秒パルサーとの間に2桁もの大きな違いが存在している²⁾。

この2桁の違いの原因を探るにあたり、我々は低質量 X 線連星の進化に注目した。

5. 低質量 X 線連星の進化

連星系の等ポテンシャル面は、図3に示すような形をしている。特に、鞍点を含む等ポテンシャル面を、ロッシュローブと呼ぶ。低質量 X 線連星の場合、低質量星はこのロッシュローブを満たしており、ラグランジュ点を通して中性子星へと物質が流れこんでいる。低質量星から流れ出した物質は、角運動量をもっているため、直接中性子星には落下できず、中性子星の周りに降着円盤を形成し、回転しながら徐々に中性子星へ落ちていく。このとき静止質量の10%にもおよぶ重力エネルギーが解放される。このため降着物質は、1千万度以上の高温に加熱されることになり、X線を放射する。このX線は、中性子星近傍から放射されるため、その周りの降着円盤や低質量星を照射し、その構造に大きな影響を与えることがある。そこで、特にこの現象のことを「X線加熱」と呼ぶ。

低質量 X 線連星の進化を考えるためには、低質量星の種類に注目する必要がある。それは、連星系の進化を支配しているのは質量降着であり、質量降着を維持するメカニズムは低質量星の種類により異なるからである。低質量 X 線連星では、低質量星の大多数は主系列星であり、なかには巨星や白色矮星の場合もある。このような系では、その質量の大部分は中性子星が担っている。つまり、極めて大雑把には、中性子星のまわりを低質量星が公転していると考えてよい。このような状況下で低質量星から中性子星へ質量が移動するためには、降着物質は角運動量を捨てなければならない。この角運動量は低質量星が受け取るものと考えられている。結果として、低質量星の(単位質量あ

たりの)軌道角運動量が増加して中性子星から離れて行き、一方、中性子星は降着物質から角運動量をもらって、その自転速度を速めていくのである。

ところで、連星間距離が大きくなるにつれ、ロッシュローブも大きくなる。もし、低質量星の大きさよりもロッシュローブが大きくなってしまふと物質の移動は止まってしまう。従って、X線を放射し続けていくには、常に低質量星がロッシュローブを満たしている必要がある。低質量星が巨星の場合には、進化につれて膨張するし、白色矮星の場合には軽くなるにつれて半径が大きくなるので、継続的にロッシュローブを満たすことができる。しかし、低質量星が主系列星の場合にそのようなメカニズムは存在しない。この場合、磁気制動(magnetic braking)や重力波放出で角運動量を失うために、逆に連星間距離は小さくなっていき、低質量星は質量を失って小さくなっていきながらも、常にロッシュローブを満たしていられるのだろうと考えられている。

この低質量 X 線連星の進化のシナリオには、実ははっきりした観測的な裏付けがあるわけではない。つぎに、観測の観点からこの低質量 X 線連星の進化について考えてみる。

6. 観測結果

低質量 X 線連星の進化に関して観測から得られる情報は、進化の速度と質量移動の量である。進化の速度は、連星周期の変化率を測定することで求められ、また質量移動の量は X 線光度の大きさから推測できる。しかし、低質量 X 線連星の場合、連星周期の変化率を測定することは容易ではない。低質量 X 線連星においては、光度変化は不規則で食がみられるものはほとんどなく、また可視光で観測できるものもごく限られているからである。これまでの観測で連星周期の変化率が測定されているのは、白鳥座 X-3、X 1822-371、EXO 0748-676、X 1820-30 の4つのみである。こ

の中で、白鳥座 X-3 は伴星がウォルフ・レイエ星であり³⁾、X 1820-30 は低質量星が白色矮星であり⁴⁾、いずれも低質量 X 線連星としては特殊なものである。従って、一般性のあるデータはこれまでのところ X 1822-371 と EXO 0748-676 からしか得られていない。観測から得られている X 1822-371 と EXO 0748-676 の連星周期の変化率はそれぞれ 3.4×10^{-7} /年と 0.9×10^{-7} /年である^{5,6)}。この大きさは、質量移動の量から推測される変化率 10^{-9} /年よりも 2 桁も大きい。しかも、低質量星が主系列星であるならば、連星系は磁気制動や重力波放出で小さくなっていくと考えられるが、どちらの系も連星周期が長くなっていることが観測されていて、系が大きくなっていることを示している。これらの矛盾については、様々な説明がなされてきてはいるが、まだ定説はない。そこで次に EXO 0748-676 の観測結果を基にこの 10^{-7} /年という大きな連星周期の変化率の説明を試みる。

7. 連星周期の変化率の解釈

EXO 0748-676 の連星周期は 10^{-7} /年の割合で伸びている。しかし、この変化率は、たとえ磁気制動や重力波放出が働いていないとしても、低質量星から中性子星への単なる質量移動では、すでに上記で指摘したように説明することができない。EXO 0748-676 の場合を具体的に見積もってみよう。

まず、質量移動の量、つまり質量降着率を X 線強度 ($L_x \sim 5 \times 10^{36}$ erg/sec) から見積もると $4 \times 10^{-10} M_\odot$ /年となる。この質量降着率による連星周期の変化率は 2×10^{-9} /年と見積もられ、観測結果 (10^{-7} /年) に比べて 2 桁も小さい。それでは、逆に観測された連星周期の変化率から、質量移動の量を見積もると $1.4 \times 10^{-8} M_\odot$ /年となる。

さらに、連星系は大きくなっていっているので、単位質量当たりの角運動量は増加していると考えられる。このことは、いったい何を意味するのだろうか？ 連星系が孤立系であることを考える

と角運動量を系にほとんど残したままで質量放出が生じていて、中性子星への質量降着はその割合にも満たないと考えられる。実際、EXO 0748-676 の X 線食中には、この質量放出により生じたと考えられるプラズマによる散乱 X 線が観測されている。

それでは、 $1.4 \times 10^{-8} M_\odot$ /年という大量の質量放出を行ない連星間距離が大きくなる一方で、低質量星はどのようにしてロッシュローブを常に満たしているのであろうか？ $10^{-8} M_\odot$ /年程度の大量の質量放出により、ロッシュローブの半径は 5×10^{-8} /年の割合で大きくなっていく。一方、低質量星の方は、単に質量を失っていただけなら小さくなってすぐにロッシュローブを満たさなくなってしまうはずである。

ここで、見逃してはならない現象に「X 線加熱」がある。中性子星からの X 線は、降着円盤および低質量星を照射する。この X 線加熱のため、低質量星の大気はもちろん、星の構造自身まで変化していることが予想される。実際に食の入と出の光度曲線の変化から、低質量星大気のスケールハイトを見積もると、X 線加熱がない時に比べ、2 倍以上も高くなっていることがわかる。また通常の低質量星の表面温度 3000 K に対し、EXO 0748-676 の場合、X 線加熱により表面温度は 10000 K 程度にまで上昇しているものと考えられる。したがって、低質量星はこの X 線加熱の影響によって膨張していると考えるのがもっともらしい。X 線加熱のもとでは、低質量星は 10^7 年程かけて新たな熱平衡状態に達し、この時その半径は 2 倍程度にまで膨張していると予想されている^{7,8)}。以上のことから、低質量星は X 線加熱の影響で膨張を続けており、結果として常にロッシュローブを満たしていると考えることができる。

つまり連星周期の変化率 10^{-7} /年は、低質量星からの大量の質量放出 ($10^{-8} M_\odot$ /年) と X 線加熱による低質量星の膨張 (タイムスケール 10^7 年) によって説明できることになる。次に、これらの結

果を取り入れて修正した低質量 X 線連星の進化のシナリオを紹介する。

8. 低質量 X 線連星から ミリ秒パルサーへ

大質量の星は、その進化の最終段階で超新星爆発を起こして中性子星をつくる。この中性子星は、強い磁場とミリ秒に近い自転周期をもち、電波パルサーとして観測されることになる。時間とともに中性子星の自転速度は徐々に落ち、 10^{6-7} 年のうちに電波パルサーとしての死を迎えることになる。

この中性子星が、低質量星と連星系を成している場合、ゆっくりと系の大きさが縮んでいき、低質量星がロッシュローブを満たすようになると低質量 X 線連星が誕生する。低質量 X 線連星は、低質量星から中性子星への質量降着により X 線を放射するが、この X 線は低質量星の大気をも加熱する。X 線加熱を受けた低質量星は膨張し、大量の質量放出をしながら、連星系は大きくなっていく。このときの連星周期の変化率は 10^{-7} /年である。この時期は X 線を放射しながら進化するので X 線活動期と呼ぶことにする。

そして、 10^7 年程たつと、低質量星は X 線加熱を受けている状態で新しい熱平衡状態に達し、膨張がストップする。この結果、質量放出もなくなり中性子星への質量降着も止まって X 線が放射されなくなる。そのため、X 線加熱も生じなくなり、低質量星は元の大きさに戻ってしまい、ロッシュローブよりも十分小さくなってしまふ。

この後は、磁気制動や重力波による角運動量損失が連星系の進化を支配することになり、系は徐々に小さくなっていく。このタイムスケールは 10^9 /年であり、この時期は低質量星はロッシュローブより十分小さいので、低質量 X 線連星は X 線を放出しない、つまり X 線休止期にあるといえる。

そして、連星間距離が十分小さくなると、低質

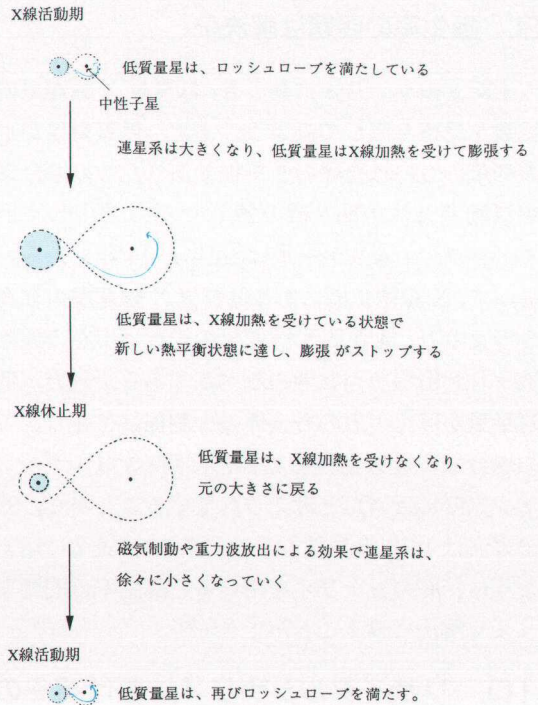


図4 X 線活動期と X 線休止期を繰り返して進化していく低質量 X 線連星の模式図。

量星は再びロッシュローブを満たすようになり、X 線活動期へと移っていく。つまり、低質量 X 線連星は、X 線活動期と休止期を繰り返しながら進化していくのである(図4)。この進化の間に、低質量星は小さくなっていき、また、中性子星は質量降着により自転速度を速めていく。そして、中性子星の自転速度が十分大きくなると、X 線休止期には電波放射をおこなうようになる。これがミリ秒パルサーである。つまり、電波パルサーから低質量 X 線連星へと姿を変えた中性子星は、低質量 X 線連星の進化の果てに再び電波源であるミリ秒パルサーとして蘇るのである。

表2 X 線休止期にあるものも考慮した、低質量 X 線連星とミリ秒パルサーの誕生率

	数	寿命	誕生率
低質量X線連星	10^4 個	10^9 年	10^{-5} /年
ミリ秒パルサー	10^5 個	10^{10} 年	10^{-5} /年

9. 誕生率の問題は解決?

上記8のシナリオに基づき、低質量X線連星の総数を見積り直してみよう。まず、低質量星が主系列星のものは全体の9割程であり、この場合X線活動期と休止期を繰り返しながら進化していく。そのタイムスケールは 10^7 年と 10^9 年である。従って、X線休止期にある低質量X線連星の存在を考えると、低質量X線連星の総数は現在の観測数より2桁程多いと考えるべきである。一方、低質量星が巨星のものも全体の1割程は存在し、この場合低質量X線連星は非常に明るい(エディントン光度に近い)と考えられていることから、その寿命は 10^7 年と見積もれる。従って、表2に示すように、8のシナリオを用いると誕生率の問題をうまく解決に導くことができる⁹⁾。

10. リサイクルシナリオにおけるその他の問題点

上記8のシナリオにより、我々は「観測から得られた連星周期の変化率」と「誕生率の問題」をうまく説明することができた。

それでは、これでX線連星が進化してミリ秒パルサーとして再生するというシナリオは確立したのだろうか。実はまだ多くの問題が残されている。上記シナリオに基づけば、低質量X線連星中の中性子星はミリ秒パルサーに匹敵する速い自転速度を持つはずである。これまでその自転を検出しようという試みは多く繰り返されてきたが、いずれも不成功に終わっている。また、ミリ秒パルサーがX線連星に進化するのなら、両者の空間分布は良く似ていると期待される。ところが、低質量X線連星は中心密度が高い球状星団の中心付近に多く存在するのに対し、ミリ秒パルサーには特にそのような傾向は見られない。さらに、誕生直後の中性子星は本当に強い磁場と速い自転速度を持つのだろうか、という疑問もある。SN 1987 Aの観測からは、その光度曲線にパルサーからの輻射の

寄与が見られないことから、できた中性子星は少なくとも磁場が弱いか自転速度が遅くなければならないと考えられている。したがって、超新星爆発により直接ミリ秒パルサーが生まれる可能性も否定できないのかも知れない。

このように、リサイクルシナリオは多くの問題点を含むものの、X線連星と電波パルサーを結び付けるシナリオとして大きな魅力をもつ。今後の理論、観測の進展が楽しみである。

参考文献

- 1) Bhattacharya D., van den Heuvel, 1991, Phys. Rep. 203, 1
- 2) Kulkarni S. R., Narayan R., 1988, ApJ 335, 755
- 3) Van Kerkwijk M. H. et al., 1992, Nat 355, 703
- 4) Stellar L. et al., 1987, ApJ 312, L17
- 5) Heiller C. et al. 1990, MNRAS 244, 39
- 6) Asai K. 1994, Ph. D. Thesis, Science University of Tokyo (ISAS Research note No. 552)
- 7) Podiadlowski, 1991, Nat 350, 14
- 8) Harpaz A. and Rappaport, 1991, ApJ 383, 739

From X-ray Binaries to millisecond pulsars

Kazumi ASAI

The Institute of Physical and Chemical Research

Abstract: A single massive star may produce a neutron star through supernova explosion, which will work as a radio pulsar. On the other hand, a neutron star born in a close binary system will become an X-ray source with the mass accretion from the companion. These two kinds of neutron stars, radio pulsars and X-ray sources, have so far been believed to take an independent evolutionary track. However, in the 1980's, a new type of radio pulsars, so-called millisecond pulsars, were discovered in large numbers. After the discovery, a scenario that X-ray binaries evolve to millisecond pulsars was proposed. Although this scenario involves several difficulties, it succeeded to explain most characteristics of the millisecond pulsars. In this article, I overview the scenario and discuss one of the main difficulties of it, i.e. birth rate problem, with possible solution.