

X線連星の超軌道周期と降着リングの歳差運動

明星大学理工学部

井上 一

3つのX線パルサー、Her X-1、LMC X-4、SMC X-1が示す超軌道周期のX線変動光度曲線（MAXIの観測によるもの）は、「歳差運動する降着リングの電子散乱により、中心からのX線強度が変調されて観測される」とするモデルにより、よく再現される。

1. X線連星の超軌道周期

X線連星は、中性子星やブラックホールの高密度星がふつうの星と連星をなし、その距離が近いふつうの星から高密度星の重力圏へ物質が流れ込み、高密度星近傍に降着した物質の重力エネルギーが解放されてX線で明るく光っているものである。X線連星の中には、連星の軌道周期より $10\sim 10^4$ 倍の周期のX線強度変動を示すものがあり、その周期は超軌道周期と呼ばれている（Kotze & Charles 2012 参照）。

超軌道周期の起源は、まだ明らかになっていない。軌道周期の $10\sim 10^2$ 倍の周期の超軌道周期については降着円盤が歳差運動をしていると考える説が有力である。しかし、降着円盤の歳差運動では、軌道周期の $10^3\sim 10^4$ 倍の長い超軌道周期を説明することはむずかしい。これらの長い周期は伴星の質量が非常に小さい連星に見られ、SU UMa型星に対して考えられている降着円盤外縁部軌道の楕円化が重要な役割を果たしているのかもしれない（Osaki 1996 参照）。

降着円盤の歳差運動は、Her X-1の35日周期のX線 on-off 活動の発見（Giacconi et al. 1973）に伴い、Katz (1973)以来、多くの研究者によって考えられてきた。しかし、なぜ歳差運動が励起されるかは明らかでなく、中心星からの放射の影響（Peterson 1977）、中心星の磁場の影響（Pfeiffer & Lai 2004）、降着円盤からの風の影響（Schandl & Meiyer 1994）等が考えられてきている。

2. 降着リングの歳差運動

伴星から流れ込む物質は、連星の回転系の上ではコリオリ力を受け高密度星に向けて角運動量を持って落下していくと考えられ、その結果、高密度星のまわりには降着円盤が形成されると考えられている。この降着円盤は、基本的には高密度星からの重力と回転の遠心力がバランスして存在しているわけだが、そこには伴星からの重力が二次的な力（潮汐力）として働いている。従って、もし降着円盤が傾いているとすると、伴星からの潮汐力が降着円盤に対しトルクを与えることになり、歳差運動が自然に起こる。しかし、降着円盤のような構造では回転軸周りの慣性率 I が他の軸のものにくらべて大きく、歳差運動が起きている状態の方がエネルギー的に高くなって、その状態は起きても長くは続かないと考えるのが常識的である。そこで、筆者は、実際のエネルギー状態はどうかを、調べた（Inoue 2012）。

Inoue (2012)では、降着円盤外縁部に降着リングができていると考え、歳差運動に伴う降着リングのエネルギー状態が調べられた。上でも述べたように、伴星からの降着物質は、連星の回転により角運動

量を持って高密度星まわりに流入してくる。その降着物質が、単位質量あたり一定の角運動量を持っていると考えると、降着物質は、まずは、その角運動量で決まるケプラー円軌道のところに降着リングを形成すると考えられる。単位質量あたり角運動量一定の気体粒子が回る降着リングの中では、ケプラー円軌道の外側を回る粒子は、重力が遠心力に勝り、内側を回る粒子は遠心力が勝り、上側を回る粒子は重力の射影成分で下向きの力を受け、下側を回る粒子は反対に上向きの力を受け、全体としてケプラー円軌道に垂直に切った降着リング断面はケプラー円軌道に向けた求心力と気体圧力の勾配がつりあって円形の形の密度分布で近似できる。そのような降着リングのエネルギー状態は、リング内気体の高密度星周りの回転の運動エネルギーと、高密度星の重力場による位置エネルギー、そして、回転運動に垂直な方向の膨らみをもたらす熱エネルギーによって決まる。今、降着リングがある傾き角、 θ を持って歳差運動をしているとすると、降着リングの回転の角運動量ベクトルは、降着物質が持ち込んできたもとの角運動量ベクトルと、それに垂直な、伴星の潮汐力がもたらすトルクベクトルとの合成ベクトルになる。そのため、リングの回転運動の角運動量の大きさは、もとの角運動量の大きさより $(\cos \theta)^{-1}$ 倍大きいものになり、降着リングの回転半径は、もとの半径より大きくなり、リング断面も膨らむ。これにより、リングの回転エネルギーと位置エネルギーは増加するが、熱エネルギーは、リング断面が膨らむことによる断熱膨張で減少する。その結果、熱エネルギーが、回転エネルギーに対してある割合より大きければ、降着リングが傾いて歳差運動をする方がエネルギー的に低いということが起こる。条件を満たす降着リングでは、歳差運動は安定して起こり得ると考えられる。

3. 超軌道周期X線光度曲線の再現

Inoue (2012)で得られた結果をもとに、筆者は次に、歳差運動をする降着リングにより、観測される超軌道周期でのX線光度曲線が再現できるかどうかを調べた。

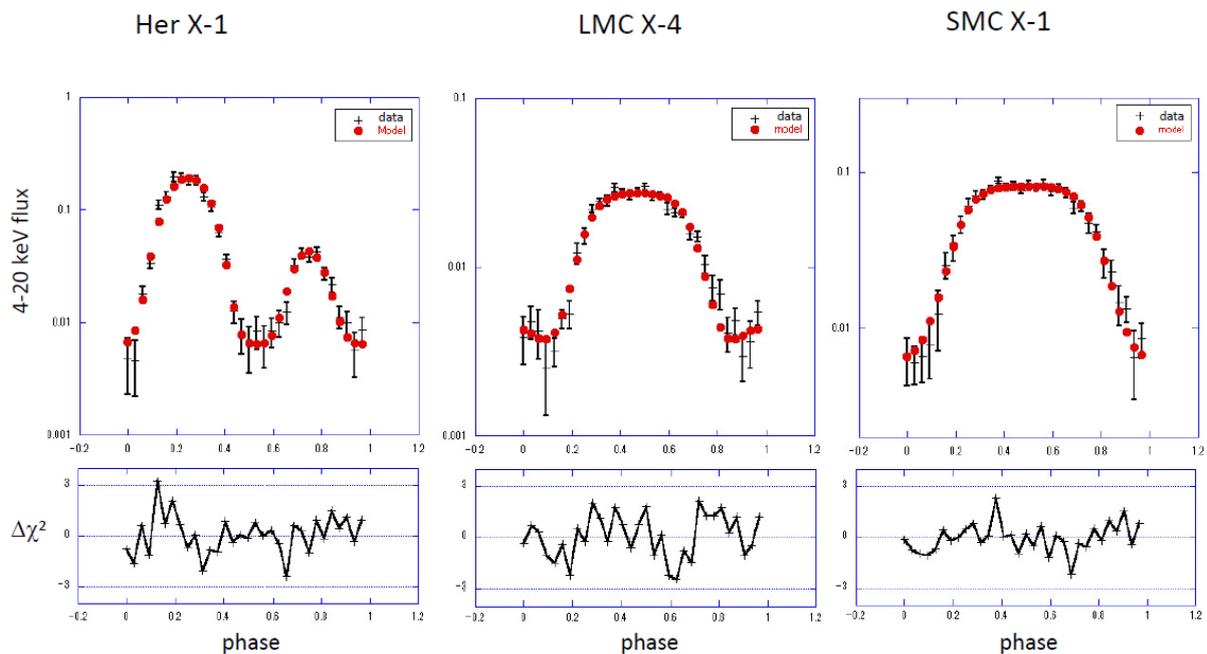


図 1 : MAXI により観測された 3 つの X 線パルサーの超軌道周期 X 線光度曲線 (十) と「歳差運動する降着リングによる観測 X 線強度の変調モデル」による最適解 (●)。(暫定結果)

観測された超軌道周期X線光度曲線としては、MAXIで観測された3つのX線パルサー、Her X-1、LMC X-4、SMC X-1のものを取り上げることにした。MAXIデータから超軌道周期を求めると、それぞれ、34.8日、30.4日、55.7日（SMC X-1については、一部周期ドリフトが見られ、その部分を除いた。）が得られ、その周期で折り畳んだ超軌道周期X線光度曲線は、図1に示されるようなものだった。次に、「歳差運動する降着リングの電子散乱により、中心高密度星表面付近からくるX線の観測強度が変調を受ける」との仮説により、図2のようなモデルによる予想X線光度曲線で、観測されている超軌道周期X線光度曲線のフィッティングを試みた。その最適解による予想X線光度曲線を、図1に示したが、観測されたX線光度曲線をよく再現している。一自由度あたりの χ^2 値は、いずれも1に近い数値を示しているが、誤差の評価が最終的なものになっていないので、ここでは具体的な数値の記述は控えさせていただく。また、物理的に興味ある最適パラメーターの数値（暫定値）を表1に示した。

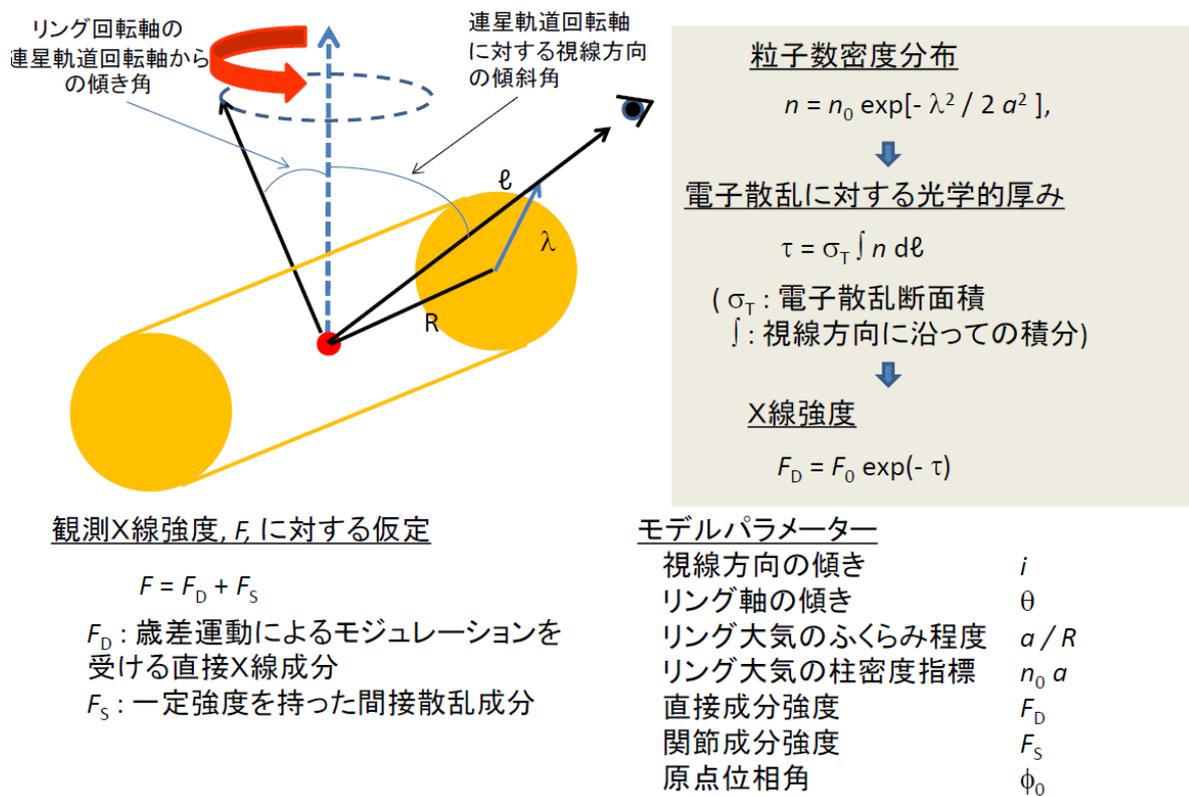


図2：歳差運動する降着リングの電子散乱による観測X線強度変調モデルとパラメーター

	Her X-1	LMC X-4	SMC X-1	
視線方向傾斜角	80°	68°	65°	食から決めた値に固定 (Nagase PASJ, 41, 1, 1989)
リング傾斜角	41° ± 1.5°	27.5° ± 2.5°	14° ± 7.5°	
$n_0 a$ (x 10 ²⁴ cm ⁻²)	4.7 +0.9 -0.6	1.25 ± 0.07	2.6 -1.1	(上限値決められず)
(a/R) ⁻¹	2.2 ± 0.4	2.8 ± 0.2	4.0 -0.5	

表1：モデルフィットで得られた主なパラメーター値（暫定結果）

4. 考察とまとめ

以上のように、X線連星に見られる超軌道周期のうち、少なくとも3つのX線パルサーのものについては、「降着円盤最外縁部に形成されていると考えられる降着リングが伴星の潮汐力により歳差運動をしており、リング中電子による散乱で中心X線源からの視線上のX線強度が変調を受けている」と考えるモデルで、観測される超軌道周期X線光度曲線がよく再現される。

視線方向の傾斜角は、X線源の食のようす等から決められている視線方向傾斜角に固定してモデルフィットを行った。食から決められた軌道傾斜角に矛盾のない最適解が得られている。

リング断面の膨らみを決めるパラメーター、 a は、等温近似の静水圧平衡を解いて求められているもので、温度の平方根に比例する。したがって、表1において $(a/R)^{-1}$ がより大きい数値の時は、降着リング内物質の熱エネルギーが回転エネルギーにくらべてより小さいことを意味している。表1で3つのX線パルサーの結果を比べると、 $(a/R)^{-1}$ が大きいとリングの傾斜角が小さい傾向が見て取れる。これは、§2. で見たように、熱エネルギーが大きいほど、断熱膨張の効果がより効いて、リングの傾斜角がより大きくなるだろうとする予想と定性的にあっている。

降着リングの回転方向に垂直な方向の気体粒子柱密度の目安である $n_0 a$ は、いずれも電子散乱に対する光学的厚み、 τ が1かそれをわずかに上回る程度の数値になっている。ところが、ほかのパラメーターの結果と組み合わせて n_0 の数値を出して、気体の熱放射冷却時間を出し、X線光度に必要な質量降着率とその冷却時間をかけて降着リング内の質量を見積もると、とても τ が1程度には大きくならない。このことから、降着リングでは、X線照射による熱流入が効いていて、冷却時間が長くのびた状態になっていることが示唆される。実際、観測されたX線光度等から、降着リングにおけるいわゆるイオン化パラメーター ξ を求めてみると予想に合った数値になっていることがわかる。

以上は、きわめて不十分なまとめであるが、この内容は、近々論文にまとめる予定であるので、詳細はそちらをごらんいただきたい。

参考文献

- Giacconi et al. 1973, ApJ, 184, 227
Inoue, 2012, PASJ, 64, 40
Kotze & Charles, 2012, MNRAS, 420, 1575
Katz, 1973, Nature Phys. Sci., 246, 87
Pettersson, 1977, ApJ, 218, 783
Pfeiffer & Lai, 2004, ApJ, 604, 766
Schandl & Meyer, 1994, A&A, 289, 149