マイクロクエーサーCyg X-1およびLS 5039の可視偏光分光観測

○永江 修、川端弘治、深澤泰司、大杉節、千代延真吾（広島大学）、長俊成、鈴木正昭、山之内啓、岩上わかな（東北大学）、岡崎彰（群馬大学）

1. イントロダクション

1-1. マイクロクエーサーとは？

*マイクロクエーサーとは相対論的ジェットを伴うX線連星である(Ribó 2005 and references therin)。
*連星系を構成するのはコンパクト天体(中性子星あるいは数M_SBH) と質量を供給する恒星である。
*変動のタイムスケールがクエーサーに比べて短いので、質量降着や放出現象を研究する上で理想的。

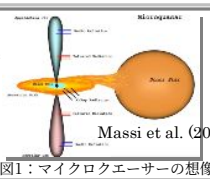


図1：マイクロクエーサーの想像図

1-2. 偏光観測について

1-2-1 意義

偏光観測 = 空間分解できない領域の幾何学構造に制限をつけられる可能性あり!!

（1）ジェットのシンクロトロン放射 ⇒ ジェットの磁場の方向や強度を推定できる

（2）星周物質（星風や降着円盤）による散乱 ⇒ 軌道面傾斜角、降着円盤の方向、散乱体密度

1-2-2 観測される偏光と固有偏光

$P_{obs} = P_{int}$ + 星間偏光 (ISP)：両者のベクトル和　P_{obs};観測された偏光、P_{int} ;天体固有偏光
$q_{obs} = q_{int}(\lambda) + P_{ISP}(\lambda)\cos 2\theta_{ISP}$　$u_{obs} = u_{int}(\lambda) + P_{ISP}(\lambda)\sin 2\theta_{ISP}$　P_{ISP} ; ISMの偏光度　θ_{ISP}; 偏光方位角

⇩ q,u ; Stokes parameter

ISPを評価しなければならない

1-3. Cyg X-1

※連星系のパラメータ
コンパクト星;~20±5M_Sのブラックホール
伴星;質量~40±10M_SO型超巨星
半径;~21-24R_C(Ziółkowski 2005)
軌道周期；~5.6 日 (LaSala et al. 1998)
軌道面傾斜角；30-60度
V-band等級；　~8.81(Massey et al. 1995)
Color excess E_{B-V}~1.09 (Ziółkowski 2005)

※可視、X線観測から示唆される星風ジオメトリ

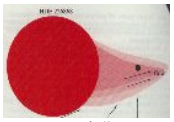


図2：星風の想像図(Miller et al. 2005)

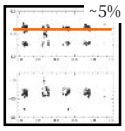
BHの方向にfocusされた星風
half opening angle < 20°
(Gies & Bolton 1986)

1-4. LS 5039

※連星パラメータ(Casares et al.2005)

コンパクト天体；Unknown⇒BHの可能性あり
伴星；質量~20-26M_S、半径~9-10R_S
軌道周期；~3.9 日
軌道面傾斜角；~25度
V-band等級；　~11(Motoch et al. 1997)
Color excess E_{B-V}~1.09

※可視偏光観測例有り (Combi et al. 2004)



星間偏光の見積り
星間偏光P；距離Dの関数⇒~2.3%
LS 5039の観測偏光度~5%
∴固有偏光度~3%　(∵5-2=3)
偏光起源：伴星の星風内での電子散乱
⇒星風中の電子数密度~10^{12}cm^{-3}

1-5. 観測

・観測: 2006 May & Aug @岡山天体物理観測所1.88m望遠鏡・観測装置：低分散可視偏光分光測光装置（HBS）

2. Cyg X-1の結果

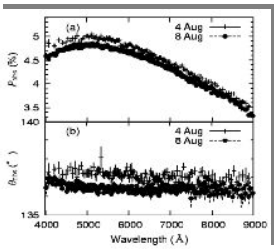


図5：偏光度P（上）、偏光方位角θ（下）Pは波長依存性を持っているが、θは波長に対して一定

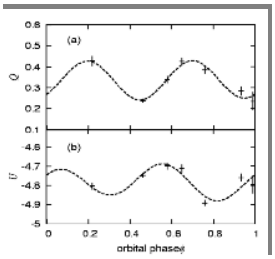


図6：ストークスパラメータQ,Uの軌道位相変化。カーブは二次までのフーリエ級数のbest-fit。

図8はV-bandの結果（ストークスQ,U)の軌道位相変化で、2次までのフーリエ級数でfitting

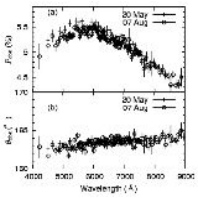
Fittingに用いた関数

$Q = q_0 + q_1\cos 2\pi\phi + q_2\sin 2\pi\phi + q_3\cos 4\pi\phi + q_4\sin 4\pi\phi$
$U = u_0 + u_1\cos 2\pi\phi + u_2\sin 2\pi\phi + u_3\cos 4\pi\phi + u_4\sin 4\pi\phi$

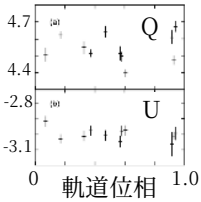
Q,Uともに軌道位相にロックした変化あり ⇒ 固有偏光有り！！

Nolt et al. (1975)；Kemp et al. (1978)； Dolan et al. (1989)が報告している値とほぼ等しく、変動の絶対値やピーク値の位相に関して経年変化はない

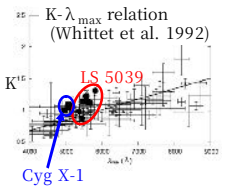
3. LS 5039の結果と考察



5月と8月では短波長領域に時間変動らしきもの有り⇒原因不明



軌道に相関した時間変動無し



観測された偏光は典型的
星間偏光の波長依存性に類似

理論散乱モデル(式①；See§4-2)

$\dot{M}$ ~$10^{-6}M_S$/yr^{-1} Casares et al. (2005)
Cyg X-1 同様、星風はθ<20°に集中していると仮定

P~0.1-0.2% ⇒ LS 5039の伴星の星風では3%の固有偏光を生み出せない ⇒

※我々の結論

固有偏光はほとんどなく星間偏光が支配的
Combi et al. (2004)と異なる

4. Discussion（Cyg X-1）

4-1. 偏光起源

※様々なモデル

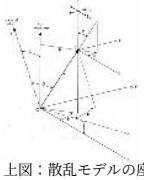
① 降着円盤での電子散乱 ⇒ HMXBでは伴星の寄与が大きく降着円盤の光は無視できる。⇒ 棄却
② 伴星の前をコンパクト天体が通過する。⇒ 理論計算では~10^{-5}%で検出不能（Dolan 1989) ⇒ 棄却
③ コンパクト天体の潮汐力で歪められた伴星周辺での電子散乱 ⇒ 最も歪められても14%（Friend & Cassinelly 1986)
⇒ 理論計算では0.023%で検出不能(Bochkarëv et al. 1986) ⇒ 棄却
④ compact星の方向へfocusされた星風内での電子散乱
⇒Chandraや可視の観測で非対称な星風があると報告 ⇒ 可能性有
⇒図6のように2回ピークを迎えることからもconsistent

密度が大きい星風があると偏光に寄与してくる

※散乱角、散乱面と偏光特性　散乱角 / 散乱面 } 軌道位相によって徐々に変化 ⇒ QとUがQU-plane上で楕円（or 円）を描く

4-2. 偏光度のモデル計算

※星風による理論散乱モデル(Cassinelli et al. 1987)


上図：散乱モデルの座標系

$$P = -\frac{3}{16}\sigma_T \sin^2 i \iint_{r\mu}(1-3\mu^2)D(r)n_e(r,\mu)d\mu dr \quad \cdots 式①$$

P；偏光度の理論値、σ_T；トムソン散乱断面積、μ；cosθ、n_e；電子数密度、D(r)=$(1-r_*^2/r^2)^{1/2}$、i；envelopeの軸と視線方向との傾斜角

仮定１：focusされた星風中のガスは完全電離

$$n_e(r,\mu) = \frac{\dot{M}(\theta)_w}{\Omega_{20^\circ} v_w r^2} \times \frac{1}{m_H}$$

m_H；水素の質量、　；星風速度
$\dot{M}(\theta)_w = \rho_w v_w \Omega_{20^\circ} v_w$ ；質量放出率
ρ_w; 星風質量密度

仮定２：ρ_w は以下の式に従うものとする（Gies & Bolton 1986)

（1） θ =0°と20°

$$\rho_w(r,\theta) = \left(\frac{r_*}{r}\right)^2 \frac{\rho_w(0,\theta)}{1-r_*/r}$$

(2)その他のθ

$$\rho_w(r,\theta) = \rho(r,0) + \{\rho(r,20^\circ) - \rho(r,0^\circ)\}\left(\frac{\theta}{20^\circ}\right)^2$$

$\rho(r,0)$=6.17×10^{-14} (g/cm^3)
$\rho(r,20)$=3.72×10^{-14} (g/cm^3)

計算結果(i=90°のとき)

r の積分範囲	伴星の半径（R⊙）	偏光度(%)
r_*-1.10 r_*	22.8	8.2×10^{-2}
r_*-1.50 r_*	22.8	1.5×10^{-1}

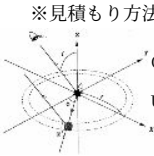
観測された偏光度の変動とconsistent
↓
偏光起源＝focusされた星風内での電子散乱

4-3. Cyg X-1軌道面傾斜角の見積もり

※連星軌道面傾斜角⇒Less certain
i=33±5°分光観測 (Gies & Bolton 1986) ⇔ i=25-67° 偏光観測(Dolan & Tapia 1989)

※見積もり方法　$Q_{int}=Q_{obs}-q_0$、$U_{int}=U_{obs}-u_0$
q0、u0：フーリエ級数の定数項

Q_{int}とU_{int}をQ_{theo},U_{theo}でfitting



$Q_{theo}=P_{90}\sin^2\alpha\cos 2\theta\cos\psi - P_{90}\sin^2\alpha\cos 2\theta\sin\psi$

$U_{theo}=P_{90}\sin^2\alpha\cos 2\theta\sin\psi + P_{90}\sin^2\alpha\sin 2\theta\cos\psi$

P_{90}：散乱角90°での偏光度
$\alpha=\arccos(\cos(\phi-\phi_0)\sin i)$：散乱角、φ：軌道位相
$\theta=\arctan(\tan(\phi-\phi_0)/\cos i)+90°$：偏光方位角

※結果

i = 56±16°
P_{90} = 0.16±0.06%
Dolan & Tapia (1989)を支持

5. まとめ

5-1. Cyg X-1

①：軌道周期に依存した天体固有偏光を検出した。ここ30年その変動特性に変化はない。
②：BHへfocusされた伴星の星風を仮定し、理論散乱モデルを用いて偏光度を評価したところ、固有偏光の起源は、focusされた星風内での電子散乱であると考えられる。
③：ストークスQUの時間変動成分から見積もった軌道面傾斜角はi = 56±16°で、過去の偏光観測の結果を支持するが、分光観測から見積もられている値（33±5°）と異なる。

5-2. LS 5039

①. Cyg X-1のような軌道周期に相関した偏光度の変化はなく、偏光度の波長依存性は典型的な星間偏光とよく似ている。
②. 強い星風(~$10^{-6}M_S$/yr)を持つO型星であっても、3%もの固有偏光を受けた報告例はなく、理論散乱モデルで計算しても0.1-0.2%にしかならないので、観測された偏光は星間偏光で説明できる。