



# 高分散分光観測から探るBe/X線連星におけるBe星ガス円盤の構造

京都大学 宇宙物理学教室

森谷友由希

共同研究者：

野上大作、岡崎敦男、今田明、神戸栄治、本田敏志、橋本修

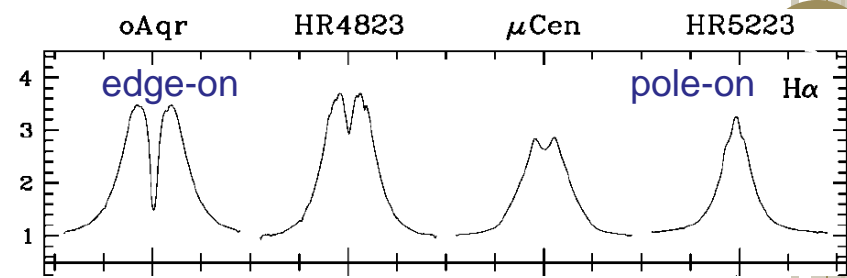
## 講演の内容/アウトライン

- Be/X線連星という連星に関する研究
- 可視光高分散分光モニター観測
  - 6年間にわたるモニター
  - Be星ガス円盤の様子

### アウトライン

1. Be/X線連星とは
2. モニター観測について
3. 長周期の変動について
4. X線で活発な時期のBe星ガス円盤について

# Be/X線連星とは

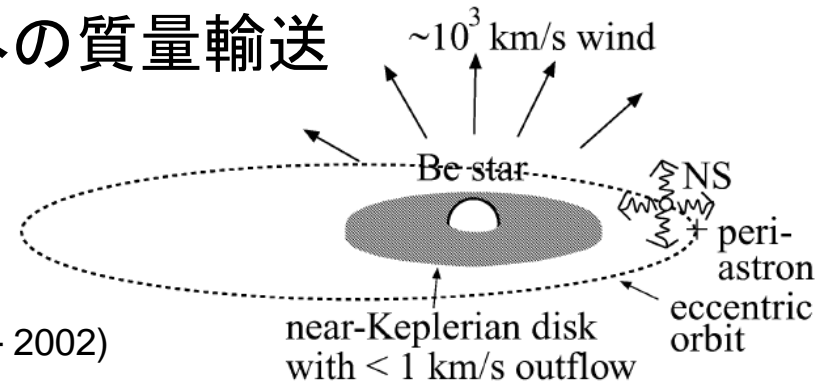


- Be星 + コンパクト星(中性子星) (Porter & Rivinius 2003 PASP, 115, 1153)
- (古典的)Be星: Balmer線等が過去に1度でも輝線として観測されたB型星(主系列星・巨星)

- 光球(吸収線) + Be星ガス円盤(輝線)
- 輝線: Be星ガス円盤を見る角度によって形状が異なる
- Be星ガス円盤(輝線): 様々な時間スケールの変動  
... 消失・再現、円盤面の摂動 etc

## ○ Be/X線連星系でのX線放射:

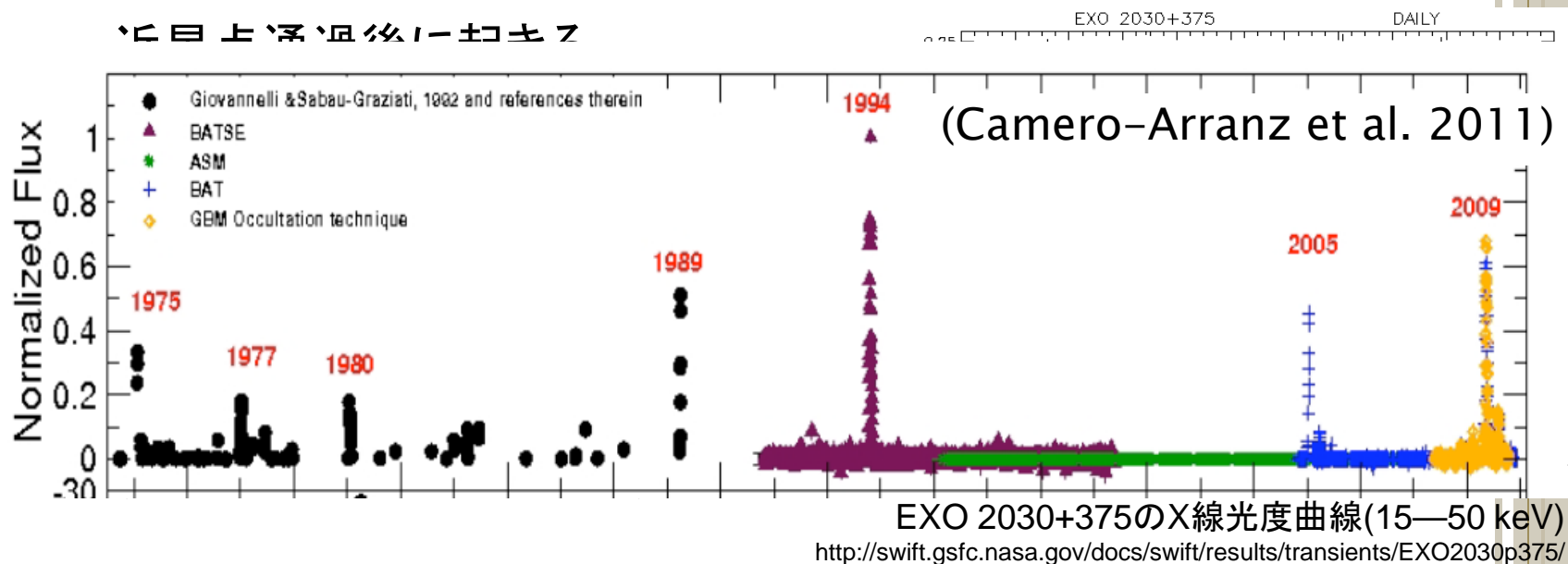
- Be星ガス円盤から中性子星への質量輸送
- Roche lobe overflow



Be/X線連星の模式図(Okazaki+ 2002)

# Be/X線連星の活動性

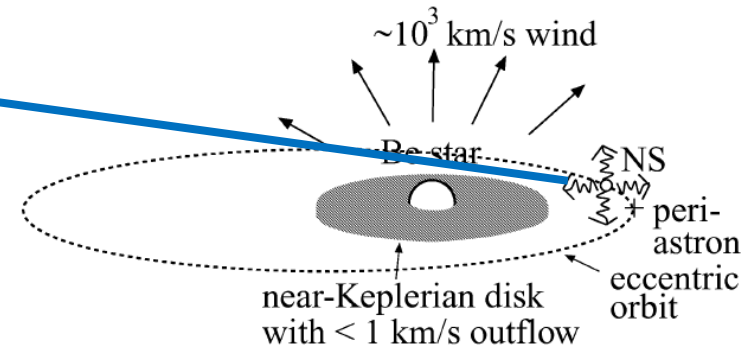
- Be/X線連星... 離心率が小さくない( $e > 0.3$ )
  - 連星相互作用(質量輸送など)に軌道位相依存性  
→ **Transient**天体が多い
- 3つの状態(2 - 10 keV):
  1. quiescent: ( $< 10^{36}$  erg/s)
  2. **normal outburst** ( $10^{36-37}$  erg/s)



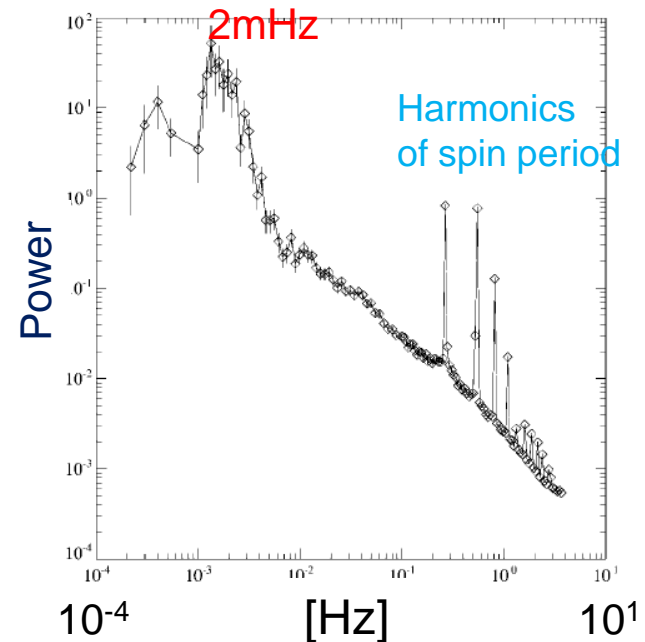
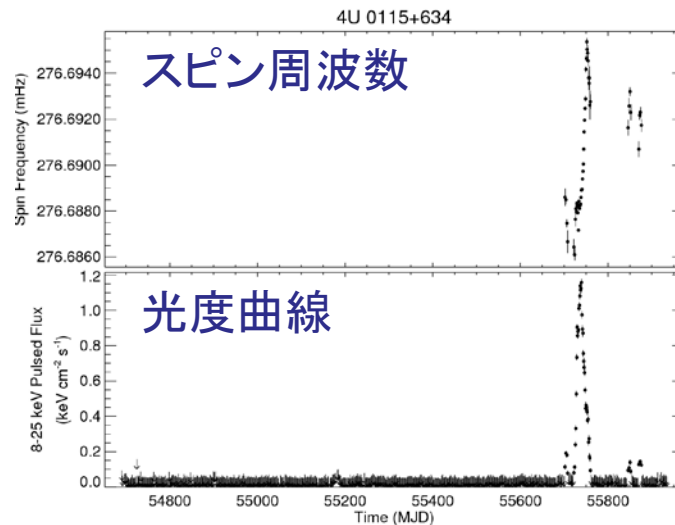
# Outburst時の観測(これまでに分かっていること)

## ○ X線...中性子星側

- Outburst 時にQPOs (Quasi Periodic Oscillations)
- 中性子星のspin-up  
→ 降着円盤の存在



Be/X線連星の模式図(Okazaki+ 2002)

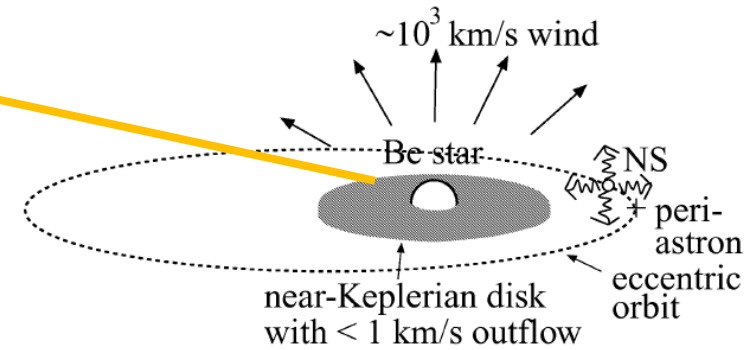


4U0115+635 のspin周波数の変遷(Fermi web pageより)  
並びに光度曲線から求めたQPO(2mHz)  
(Heindl + 1999, ApJ, 521, L49)

# Outburst時の観測(これまでに分かっていること)

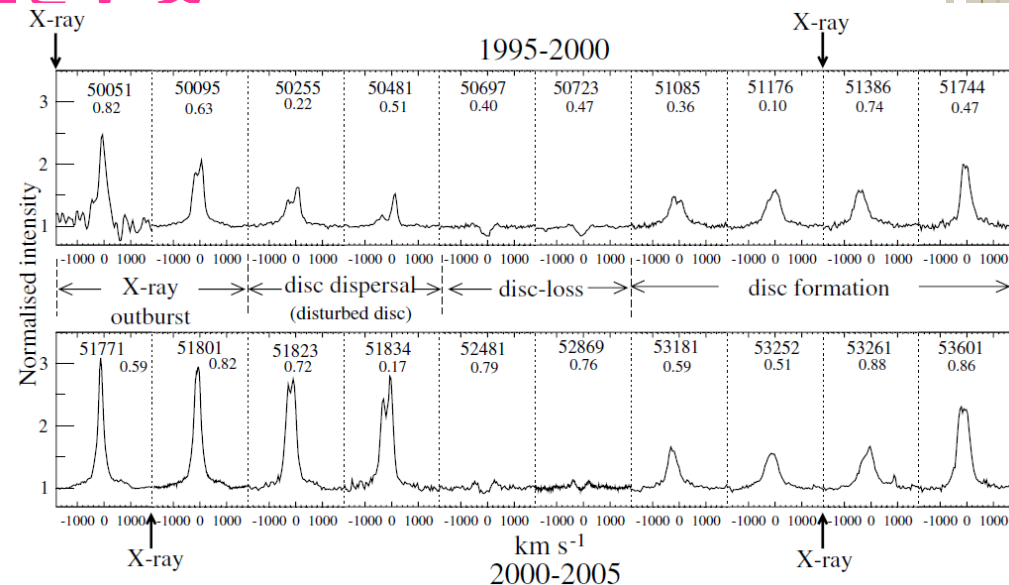
## ○ 可視～近赤外...Be星側

- Giant outburst前後に輝線が強くなる  
→ Be星ガス円盤が成長
- Profile の変化  
→ outburst前後で円盤面の角度が変わるor歪んだことを示唆



Be/X線連星の模式図(Okazaki+ 2002)

## ○ 詳しい質量輸送機構については未解明



4U0115+635 のH $\alpha$ 輝線の変遷(1995~2005)  
Reig + (2007) A&A 462, 1081

## 詳しい質量輸送機構への切り口

- Be/X線連星における質量輸送
  - Be星ガス円盤から中性子星へ  
→つまりBe星ガス円盤はmass donor!
  - 一方でOutburst中のBe星の観測は不足している
    - 特にgiant outburst...めったに起きない為
  - Be星ガス円盤の様子が詳しく分かれば質量輸送機構解明への切り口になるのでは!?
- Be/X線連星におけるBe星ガス円盤のモニター観測をする!

「Outburst 前後のBe diskを見たい！」

# 研究目的

## ○ Outburst 前後のBe diskを見たい！

- これまでの研究からわかっているBe星ガス円盤の様子
  - 大きく成長している
  - Giant outburst 前後にはBe星ガス円盤の面が変化していること or 大きく歪んでいる可能性
- モニター観測を行いBe星ガス円盤の変化を詳しく調べる
  - Outburstを起こす時と起こさない時のBe星ガス円盤の違いは？
  - Normalとgiantの違いは？

## ○ Be diskの変動に関する系統的な観測

- Be星ガス円盤自体の変動もある
- 長期的なものものと短期的なものものを切り分ける
- 短期的なもの ... Be/X線連星系に独特
  - 時間的に密な観測が少ない



# 可視光高分散分光モニター観測

## ○ 可視光

- Be星ガス円盤を見る...中性子星周りからの寄与は少ない (X線: 中性子星周辺)
- 光球 + Be星ガス円盤の情報

## ○ 高分散

- 中性子星と相互作用するのはBe星ガス円盤の外側 ... Kepler速度  $\sim 10\text{km/s}$

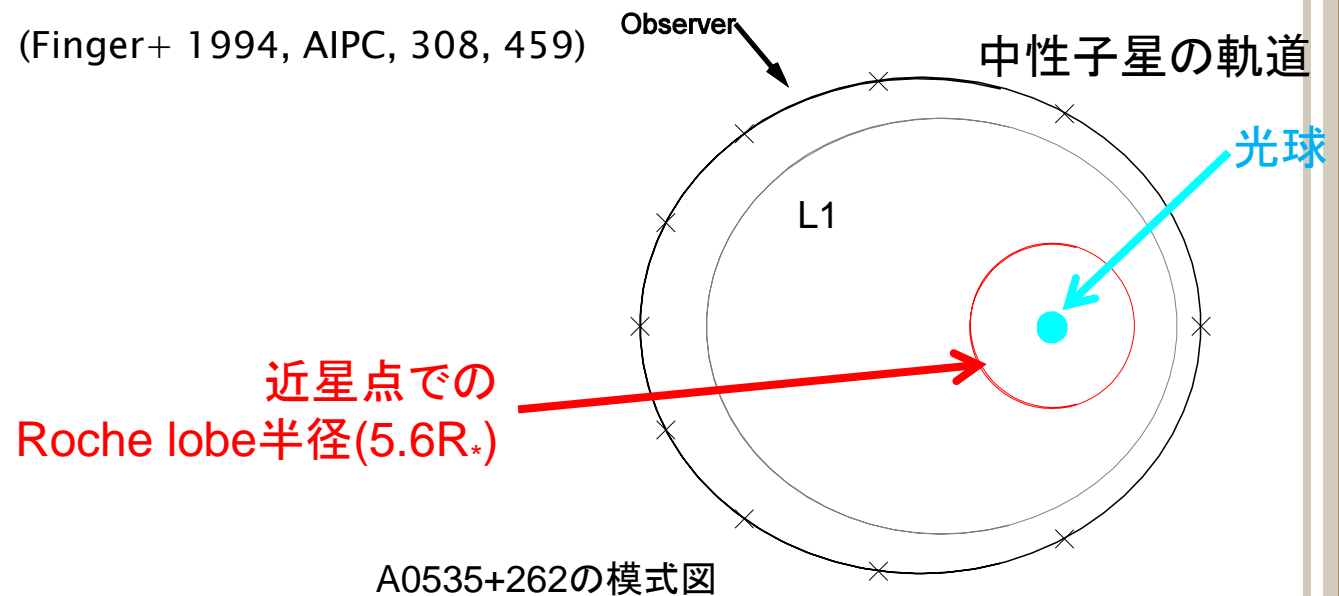
## ○ Target: A0535+262 / V725 Tau

- (日本コミュニティで) 高分散分光モニター観測ができる唯一の天体
  - 軌道周期が程良く長い
  - 明るい

# Target: A0535+262/V725 Tau

## ○ A0535+262/V725 Tau

- O9.7IIIe + NS (Giangrande+ 1980, A&AS, 40, 289)
- NS: 103-s pulsar (Coe+ 1975, Nature 256, 630)
- O9.7IIIe:  $m_V \sim 8.9 \text{ mag}$  (Giangrande+ 1980, A&AS, 40, 289)
- $P_{\text{orb}} \sim 110 \text{ days}$
- $e \sim 0.47$  (Finger+ 1994, AIPC, 308, 459)



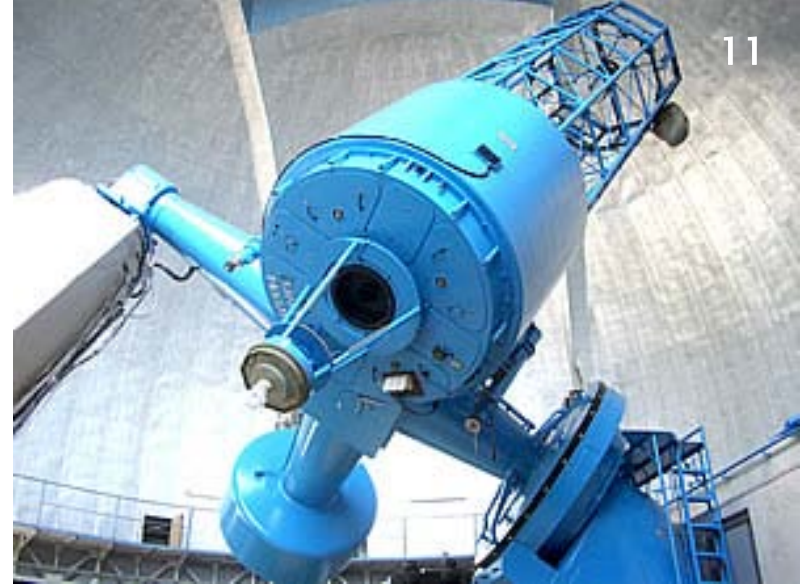
## 観測について

### ○ OAO 188cm/HIDES

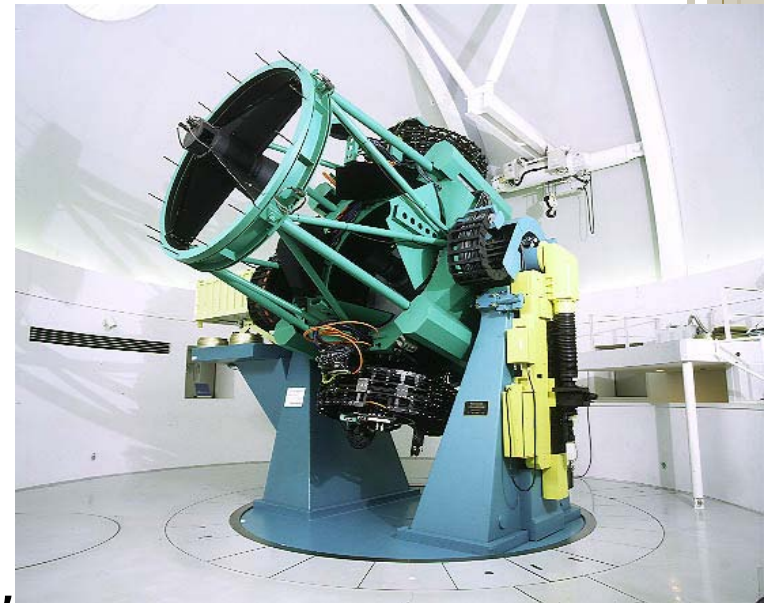
- 波長域 3500 - 6800 Å
- 波長分解能  $R \sim 60000$  @H $\alpha$
- $S/N \gtrsim 100$  @H $\alpha$

### ○ GAO 1.5m/GAOES

- 波長域 4800 - 6700 Å
  - 波長分解能  $R \sim 30000$  @H $\alpha$
  - $S/N \sim 100$  @H $\alpha$
- 
- 2010年10月以降のデータは  
天候に恵まれず  $S/N < 50$  @H $\alpha$



188cm tel. @OAO

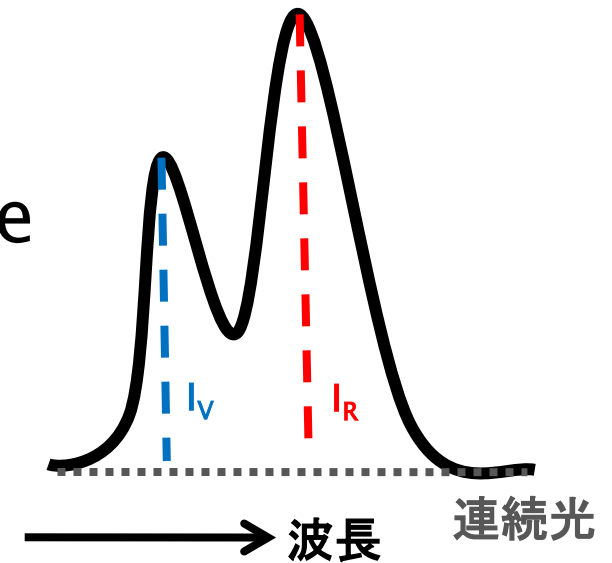


1.5m tel. @GAO

## 観測量について

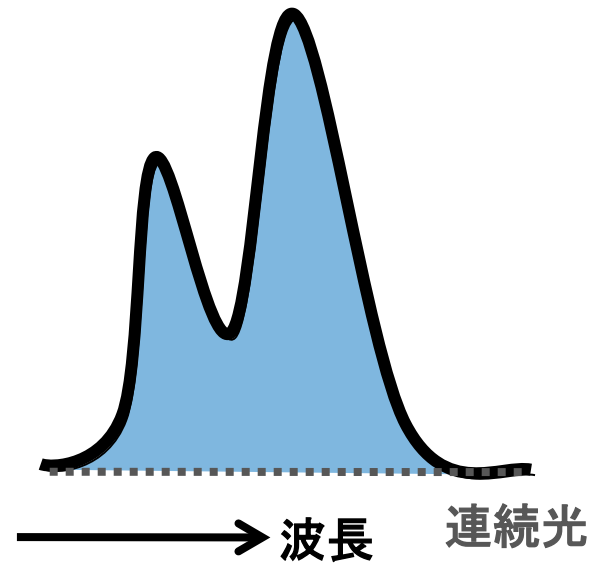
- **V/R比**: double-peaked profile の非対称性を示す

$$V/R = I_V/I_R$$



- **EW(等価幅)**: 連続光に対する輝線の強さを示す

- 輝線...負の値



# 観測結果

## ○ 観測期間

- 2005年11月～2011年10月
- 114夜
- 短期間集中観測  
(1週間～10日)
- 追観測

Period	Nights	Comments
2005.11.24 – 2005.12.03	7	Aiming at short-term variabilities.
2006.12.18	1	
2007.11.07 – 2007.11.14	7	Aiming at short-term variabilities.
2007.12.16 – 2008.01.31	6	
2008.03.11 – 2008.03.21	2	
2008.10.01 – 2008.12.12	6	
2008.12.25 – 2009.01.12	16	Aiming at short-term variabilities. The normal outburst occurred.
2009.03.12 – 2009.04.09	2	
2009.08.31 – 2009.11.23	7	
2009.11.30 – 2009.12.12	10	Aiming at short-term variabilities. The giant outburst occurred.
2009.12.16 – 2010.01.13	8	The fading phase of the giant outburst.
2010.01.16 – 2010.03.30	11	The bright normal outburst occurred.
2010.08.20 – 2010.10.12	3	
2010.10.22 – 2010.10.25	2	Around the periastron passage. The normal outburst occurred.
2010.11.02 – 2011.01.27	6	
2011.01.29 – 2011.02.05	8	Aiming at short-term variabilities. One week before the giant outburst.
2011.02.24 – 2011.03.28	5	
2011.09.07 – 2011.10.07	7	Relatively intensive observations around periastron passage (22 September 2011).

1. 長周期変動の検出
2. X線活動期におけるBe星  
ガス円盤の詳細な様子を  
観測

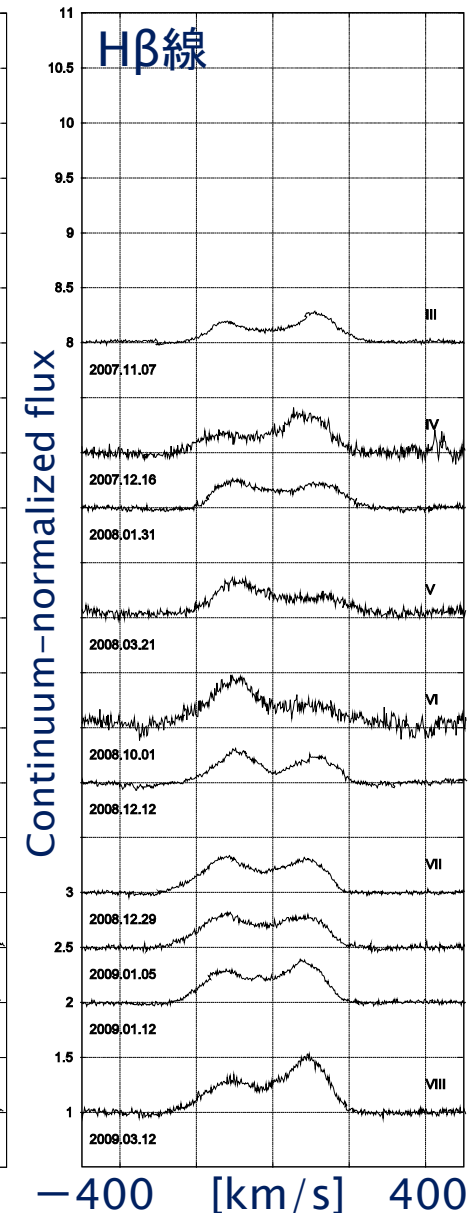
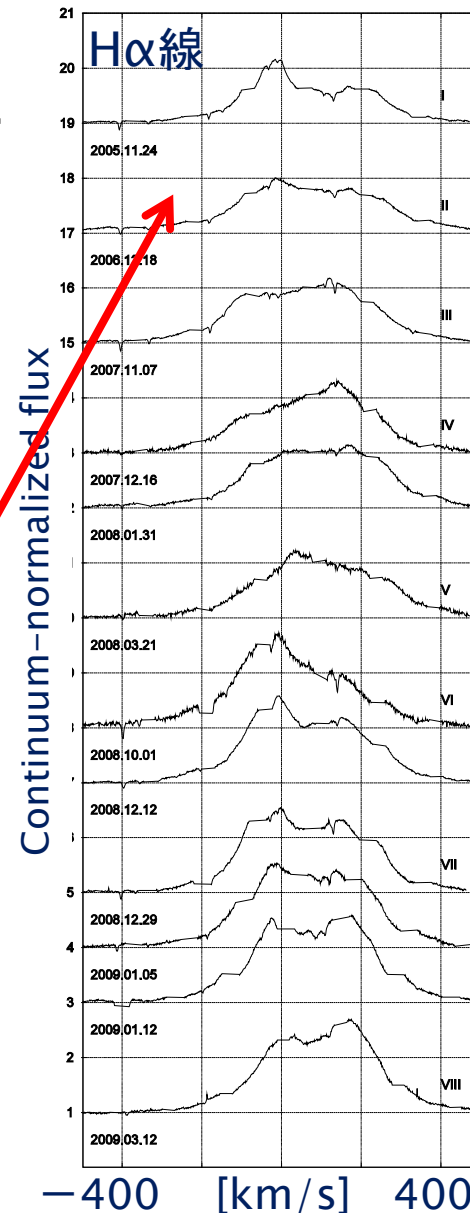
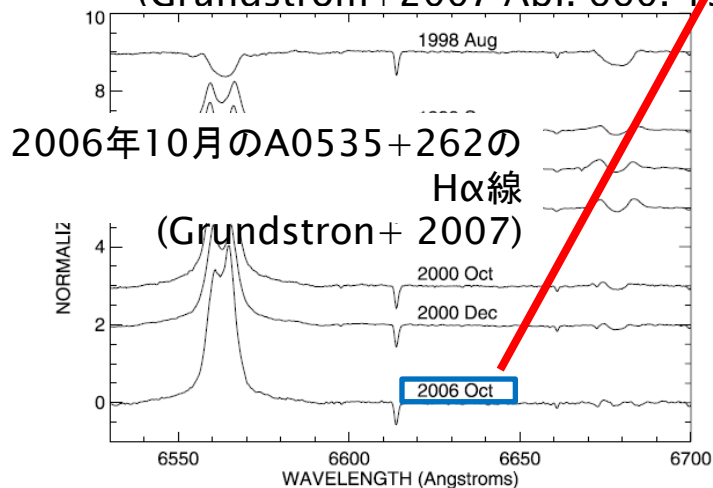


## 長周期変動の検出

14

# 周期的なprofile変化!?

- 2005年11月～2009年3月迄の観測
- Profile 変動
  - 徐々に輝線は強く
  - 非対称... V/R比は変化
  - V/R比が $< 1$ から $> 1$ へ2ヶ月以内に变化  
(Grundstrom+2007 Apl. 660. 1398)



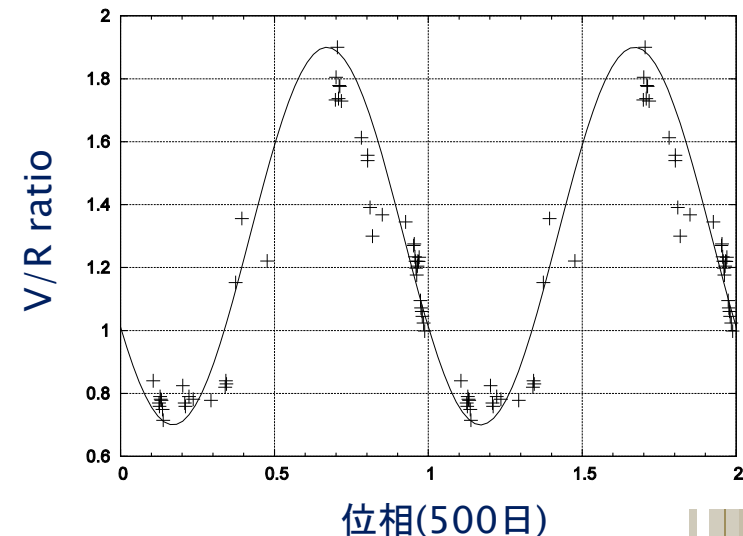
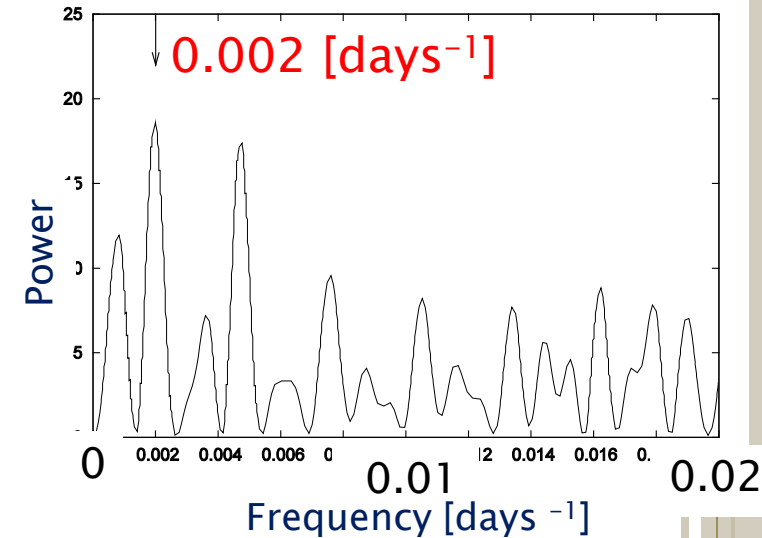
# V/R比の周期を同定

## ○ V/R比の変動

- 周期的な変化
- Fourier解析
  - $500 \pm 15$  days
- V/Rの最大値 ... V/Rの最小値の逆数になっていない

## ○ 他の文献とconsistent

- $\sim 1 - 1.5$  years  
(Clark +, 1998, MNRAS, 294, 165 )
- $\sim 1.5$  years  
(Haigh et al., 2004, MNRAS, 350, 1457)





# 500日変動の正体は？

## ○ Global One-armed oscillation

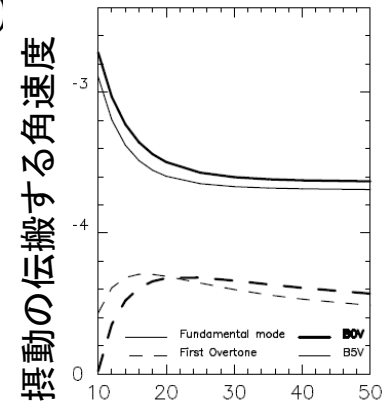
(Okazaki 1996, PASJ, 48, 305; Papaloizou+ 1992, A&A, 265, L45)

- 密度の摂動がBe disk内を伝搬

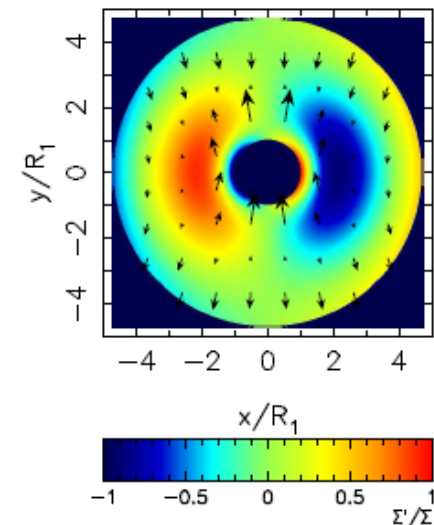
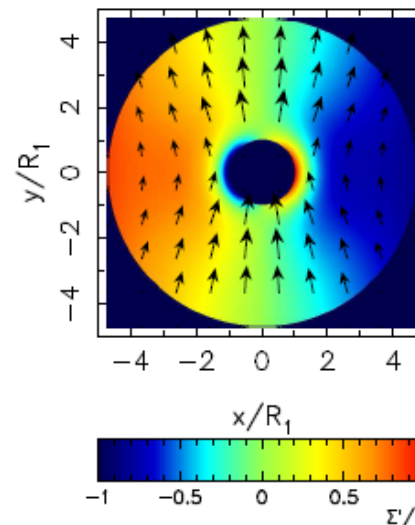
## ○ Be/X線連星のOne-armed oscillationを計算

(Oktariani & Okazaki, 2009, PASJ, 61, 57)

- 比較的小さな軌道  
... 周期が軌道の大きさ/質量比による
- 比較的大きな軌道  
... 周期はほぼ一定
- A0535+262の場合  
... ~2 year



2体間の距離/星の半径

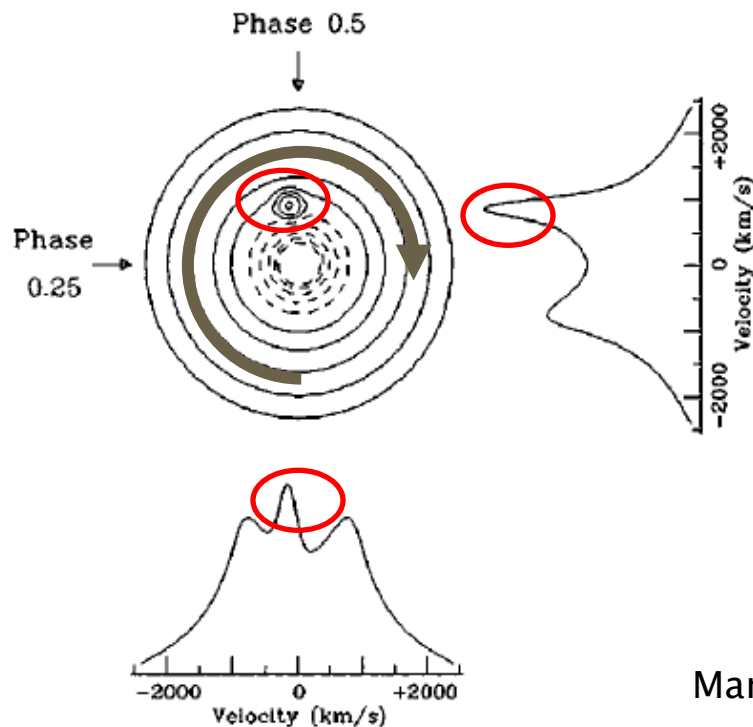


D=10R<sub>1</sub>のときの基本振動と倍振動の  
表面密度分布(摂動部分)  
(Oktariani & Okazaki, 2009)

# 非対称構造の可視化 - Doppler tomography

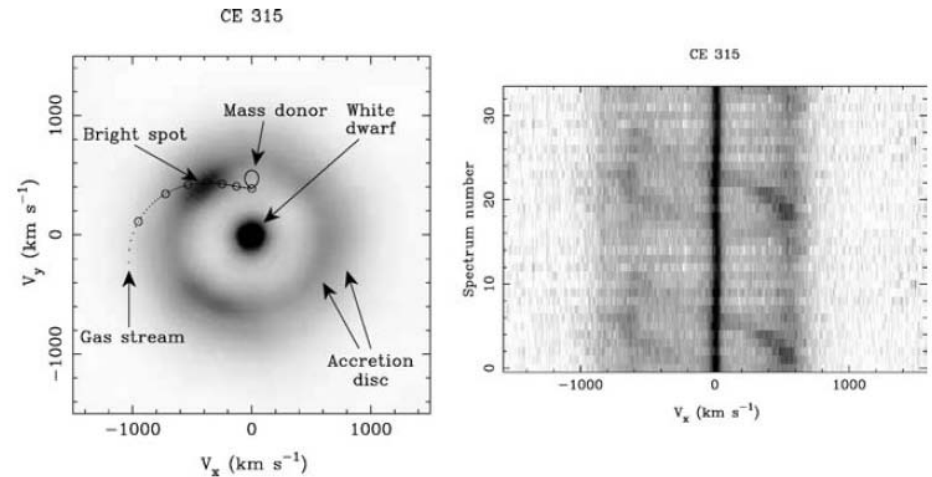
## ○ Doppler Tomography

... 特定の周期をもつProfile 変動を焼き直す



Doppler Map  
(Velocity 平面)

← Line Profile 変動



Marsh (2001, 2005)

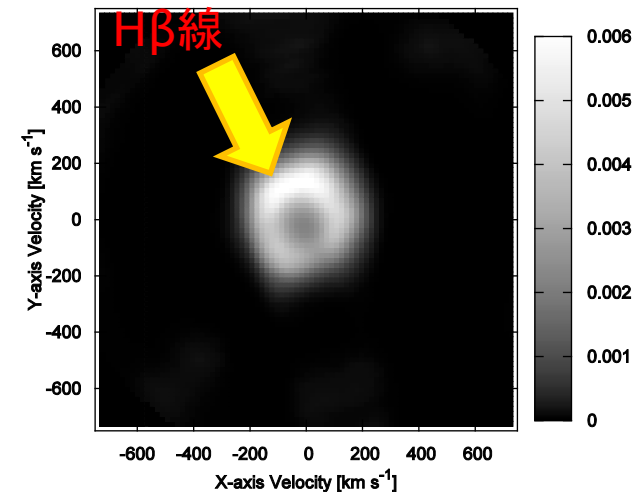
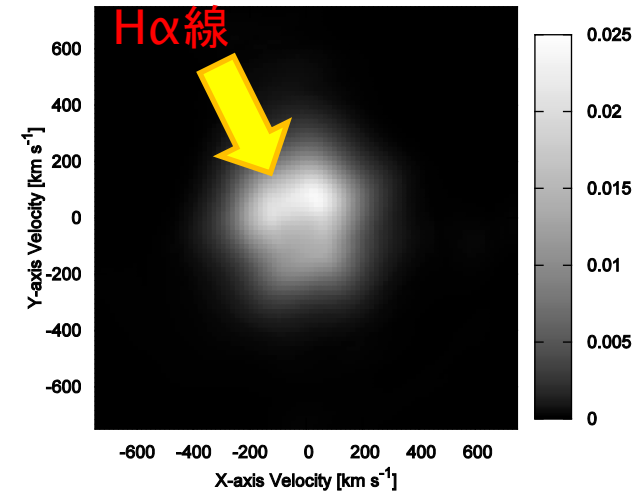
# 非対称構造の可視化 - Doppler tomography


## ○ H $\alpha$ 線 / H $\beta$ 線にDoppler Tomography を適用

- 周期: 500日(軌道周期ではない)
- H $\alpha$ 線: 47夜
- H $\beta$ 線: 35夜 ... 観測期間 < 500日
- 軌道運動による補正なし
  - 0.1~1Åの不定性

## ○ Velocity Map

- H $\beta$ 線を出す領域 ... H $\alpha$ 線の領域よりも内側にまとまっている
- 非対称な構造
- 干渉計以外の手法でBe星ガス円盤の非対称構造の様子を可視化に成功





# X線活動期におけるBe星ガス円盤 の様子

20

# X線活動期

○ 2009年3月～2011年10月: 68夜

● **giant outbursts 2回**

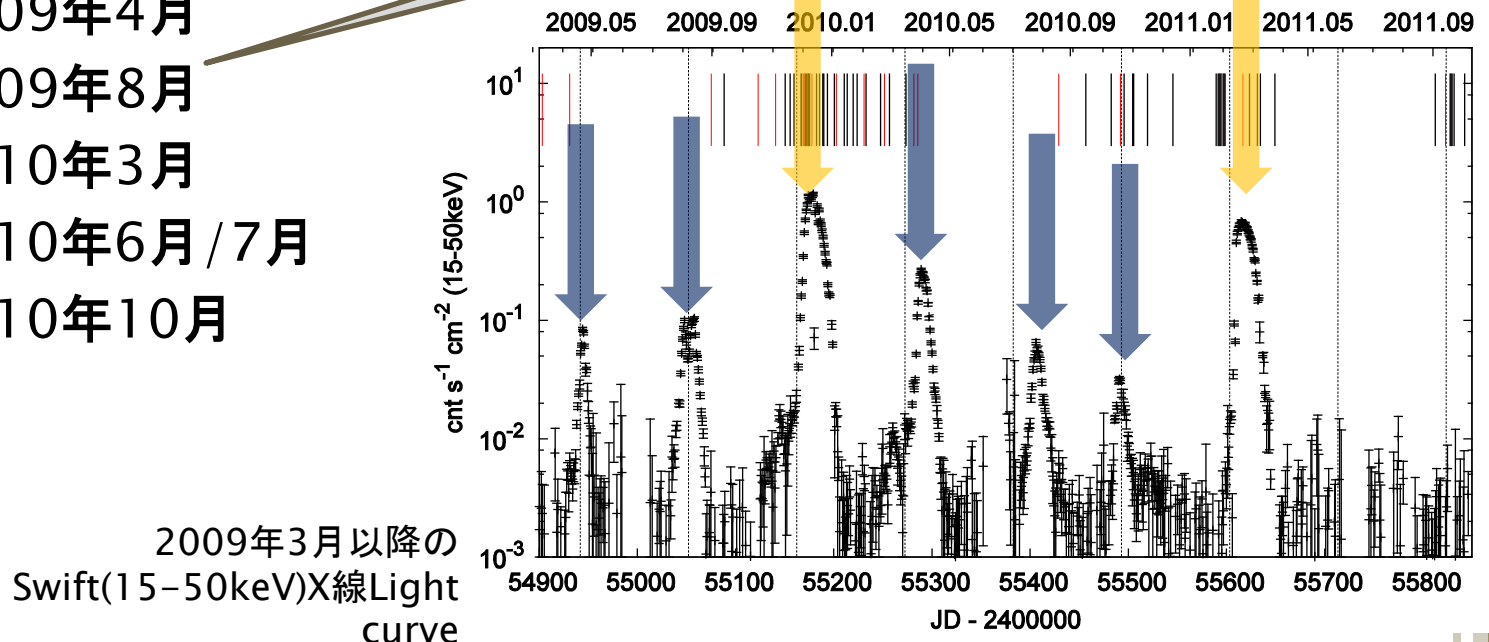
- 2009年11月/12月  
... 全体、特に立ち上がり期を密に観測
- 2011年2月

● **normal outbursts 5回**

- 2009年4月
- 2009年8月
- 2010年3月
- 2010年6月/7月
- 2010年10月

とても明るい

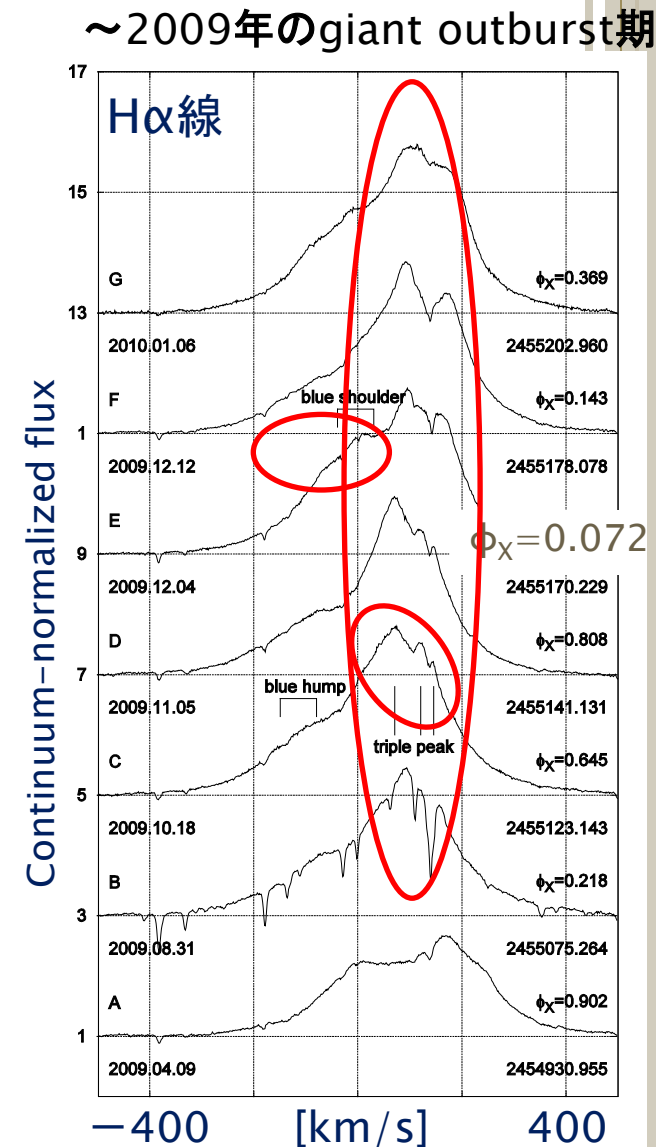
2つのpeakを持つ



# Profile変動

## ○ 変動の主な特徴

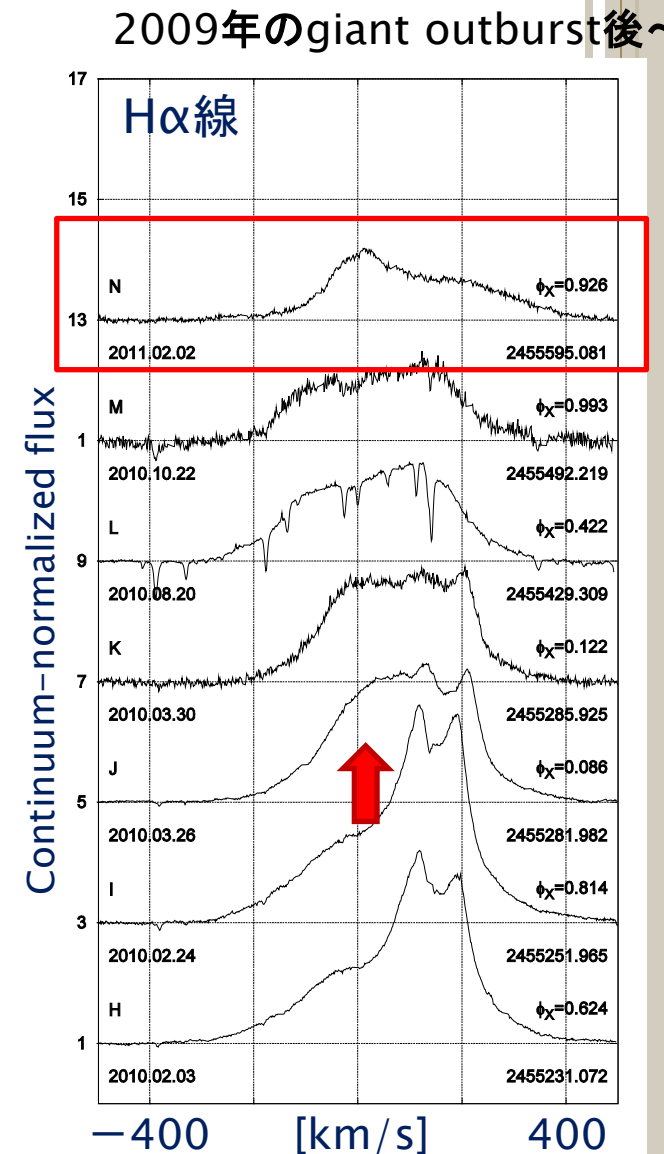
- **Blue “shoulder”**: 近星点通過後
- **Enhanced component**: 2009年のgiant outburst前後で明るい成分が見られる
- **Triple peak**: enhanced componentは時々triple peakを持つ



# Profile変動

## ○ 変動の主な特徴

- **Blue “shoulder”**: 近星点通過後
- **Enhanced component**:  
2009年のgiant outburst前後で  
明るい成分が見られる
- **Triple peak**: enhanced componentは時々triple peakを持つ
- 2010年3月のnormal outburst時に大きな変動がある
- 2011年のgiant outburst時にはenhanced componentが見られない



# 他の変動

## ○ 等価幅

- EW(H $\alpha$ )とBe disk半径  
(Grundstrom+2007 ApJ, 660, 1398)

- |EW(H $\alpha$ )| = 13Å:  
Roche lobe 半径

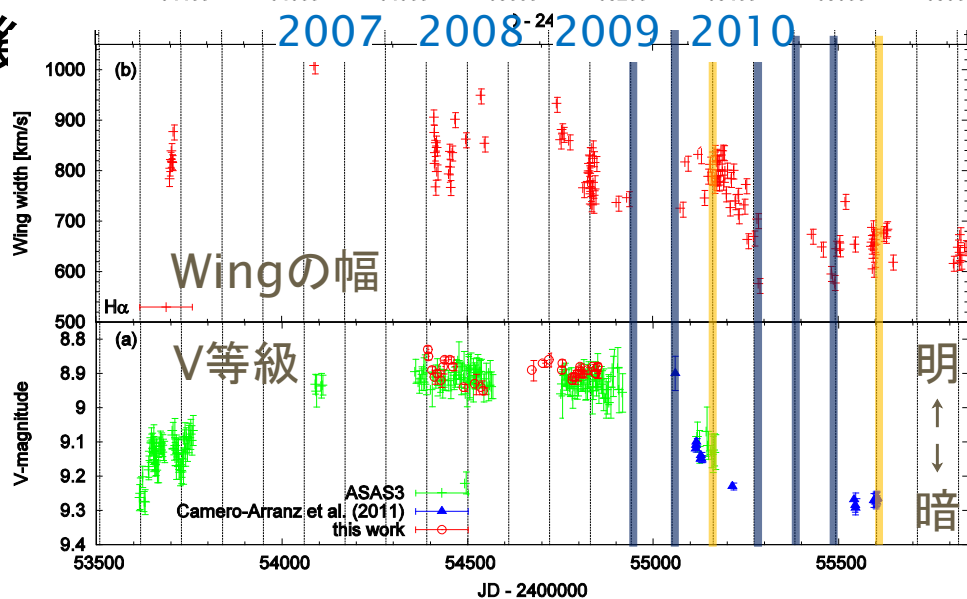
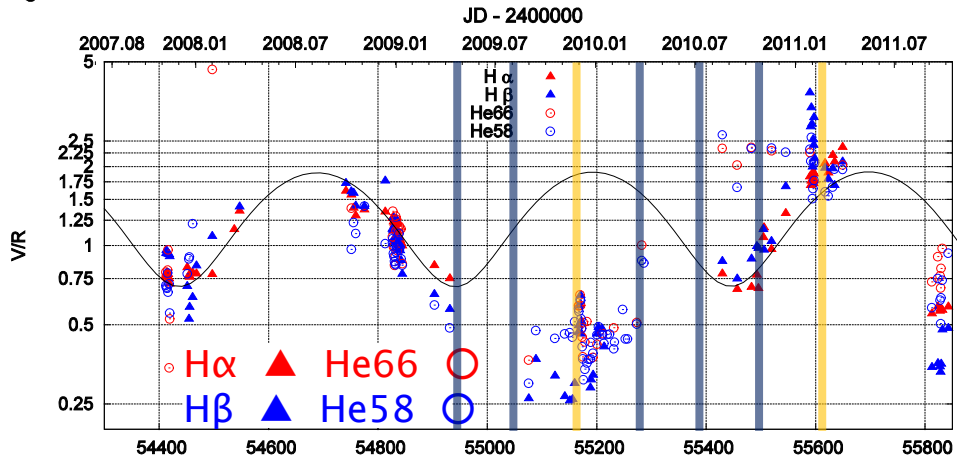
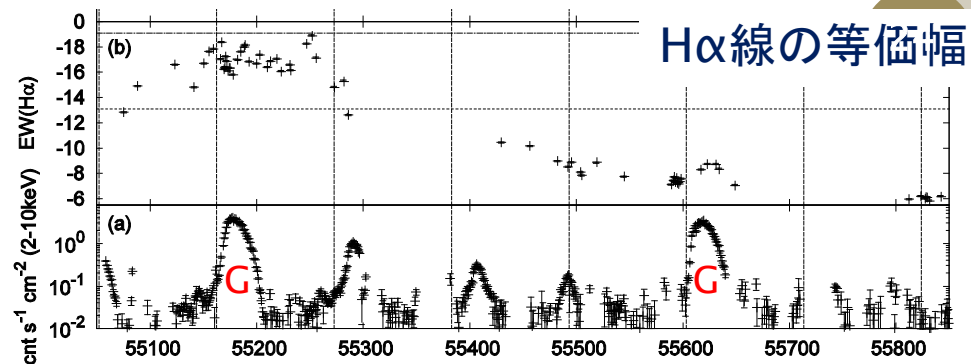
2009年8月のoutburst後

## ○ V/R比

- 2009年8月のoutburst後  
... 500日変動の傾向外

## ○ H $\alpha$ 線のwingの幅

- 2008年頭から減少
- Be diskの内側が薄くなっている





## 変動をまとめると...

- Blue shoulder: 近星点通過後
- Enhanced component
  - 2009年のgiant outburst 前後
  - 2011年のgiant outburst 前後には見られない
- 等価幅: 2009年のgiant outburst 付近で最大
  - H $\alpha$ 線の等価幅: 2009年8月のoutburst後にBe diskがRoche半径に到達したことを示唆
- V/R比: 2009年8月のoutburst後に500日振動から外れる
- H $\alpha$ 線wingの幅: 2008年頭から狭くなり始める
  - Be diskの内側の密度が薄くなってる

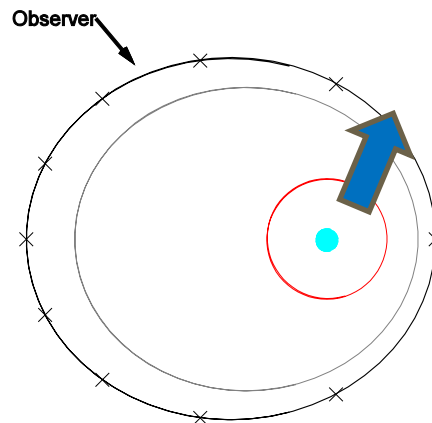
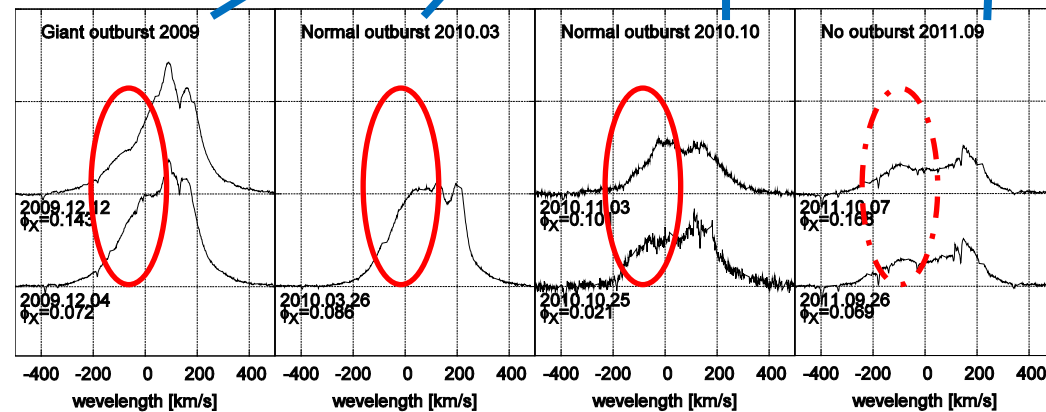
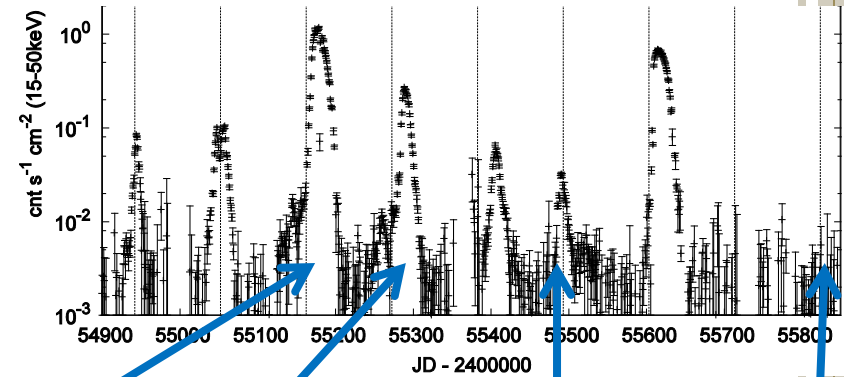
# 構造その1: 濃いガス流

## Blue “shoulder”

- 近星点通過後( $\phi_X \sim 0.1$ )
- Outburstに付随
- Be disk の外縁部から出ている

## Be diskから中性子星に向かうガス流

- 流れたガスの降着でoutburstが起きる



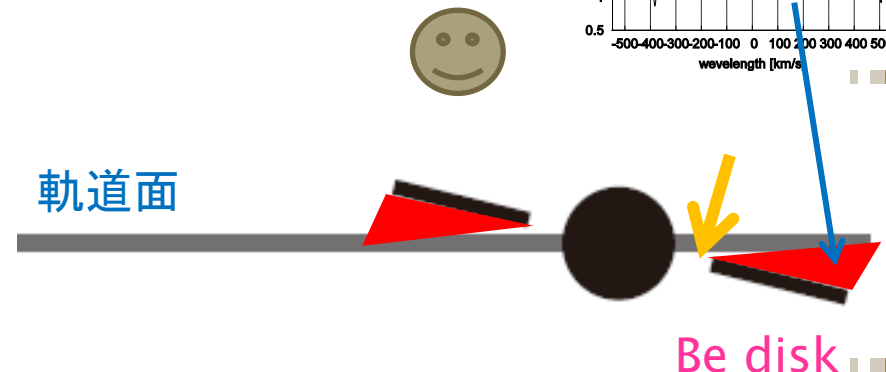
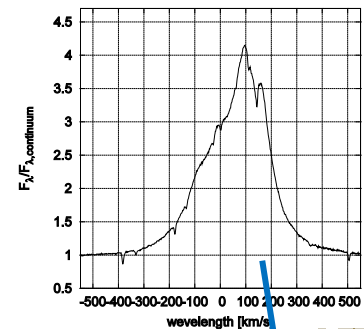
## 構造その2: Warped Be disk

- 2009年のgiant outburst前
  - ... Be星ガス円盤が準Kepler円盤から外れている
    - Enhanced component
      - 時々triple peakを持つ
    - Be星ガス円盤がRoche半径より大きい値を示唆 (H $\alpha$ 線の等価幅)
      - 質量輸送、中性子星の存在で実際には大きくなれない
      - 半径方向ではなく鉛直方向にも成長！？
    - V/R比が500日周期変動の予測値から大きく外れる
  - Warped Be disk

## 構造その2: Warped Be disk

### ○ Tidally warped Be disk (Martin+ 2011, MNRAS, 416, 2827)

- Be星ガス円盤面と軌道面が傾いている
  - kick velocity (asymmetric supernova)
- 光球からのトルクを受けない
  - 光球表面とBe星ガス円盤内縁部が接していない
  - 2008年初頭にH $\alpha$ 輝線のwing幅が減少  
→この頃から内縁部の密度減少、トルクを受けなくなる
- 中性子星からの潮汐力によりBe diskが歪む
- enhanced component
  - 赤い方側のみ見えている  
...warped成分の片方だけ見えている

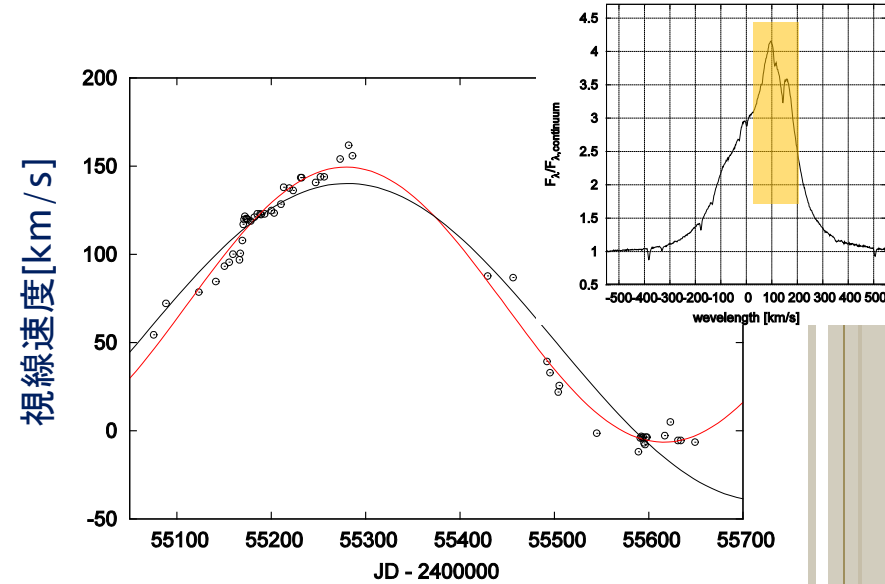


$$RV_{enhanced} = A * \sin \left[ \left( \frac{t - T_0}{P_{prec}} + \delta \right) 2\pi \right] + B,$$

A [km s <sup>-1</sup> ]	$\delta$	$P_{prec}$ [days]	B [km s <sup>-1</sup> ]	$\chi^2/d.o.f$
78.0 <sup>-4.0</sup> <sub>+5.0</sub>	0.09 <sup>-0.02</sup> <sub>+0.02</sub>	674 <sup>-38</sup> <sub>+26</sub>	71.5 <sup>-4.0</sup> <sub>+5.0</sub>	1.4
90.0 <sup>-7.5</sup> <sub>+3.5</sub>	0.01 <sup>-0.01*</sup> <sub>+0.00</sub>	886 (fixed)	50.2 <sup>-2.0</sup> <sub>+3.6</sub>	0.5

## Warped成分の推定位置

- Warped 成分の視線速度から位置を推定
  - 周期674日
- 2つの場合



	Be星ガス円盤 (軌道に対して)	Warped成分 (円盤に対して)
Case 1	順行	順行
Case 2	逆行	逆行

Warp成分の進行

Be diskの回転

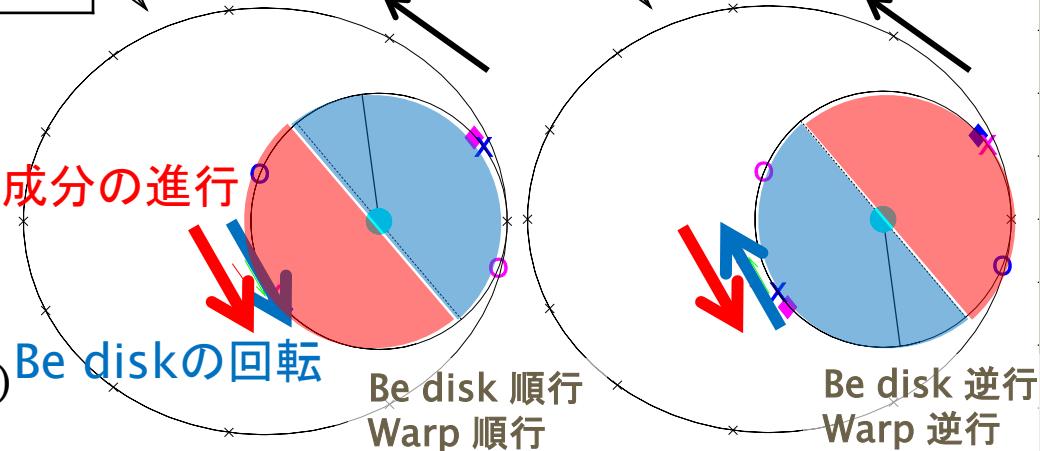
Be disk 順行  
Warp 順行

Be disk 逆行  
Warp 逆行

O: ginat outburst (2009.11)  
◆: normal outburst (2010.03)  
X: giant outburst (2011.02)



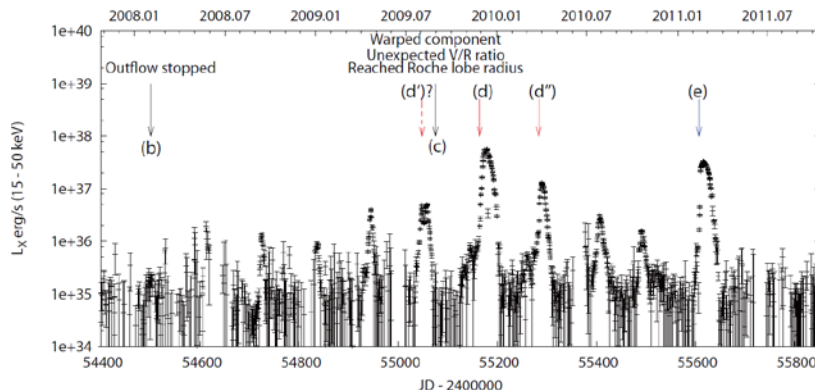
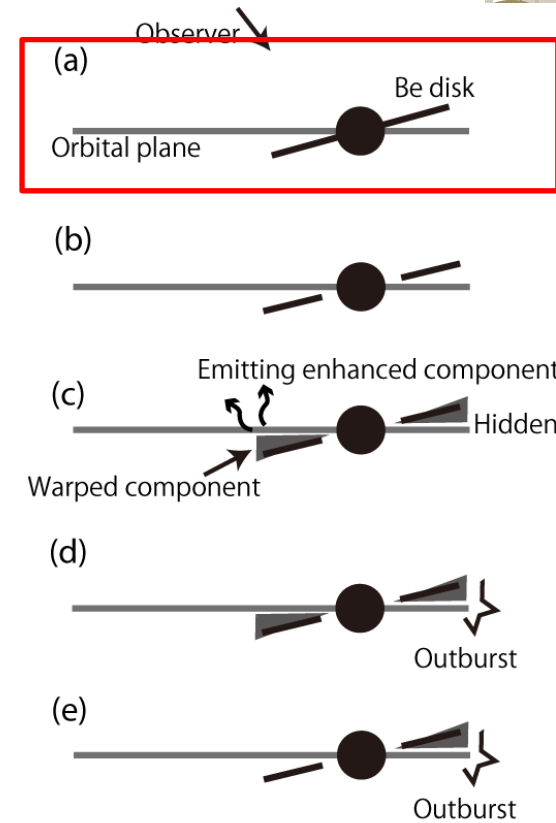
中性子星の軌道



# X線活動期のBe星ガス円盤の様子

## Be星ガス円盤、warped成分とともに順行

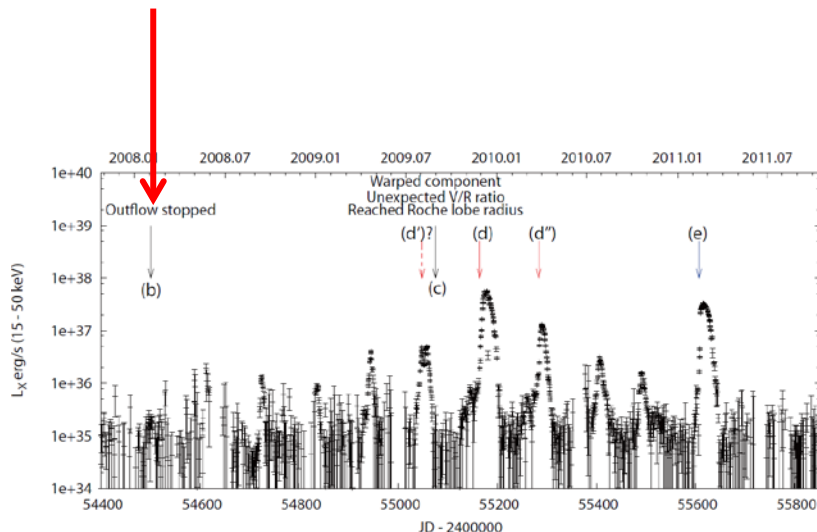
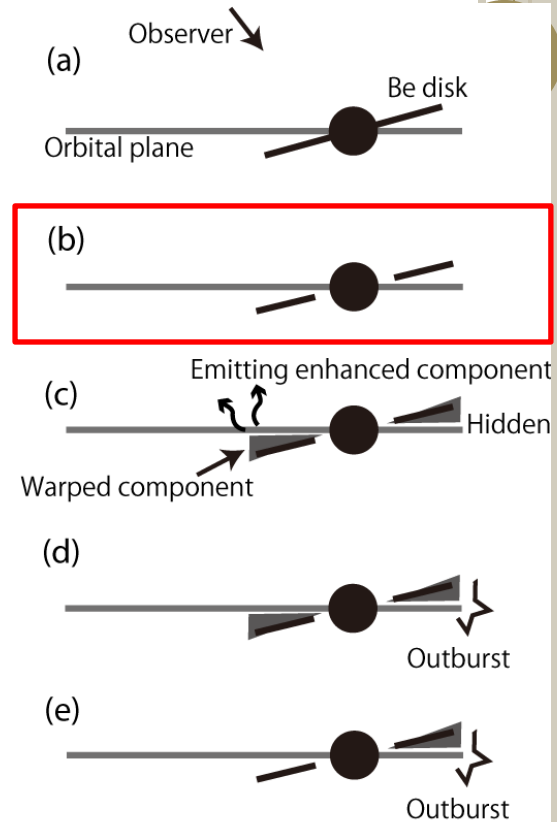
a. 最初(2005年11月)Be星ガス円盤はKepler回転



# X線活動期のBe星ガス円盤の様子

## Be星ガス円盤、warped成分とともに順行

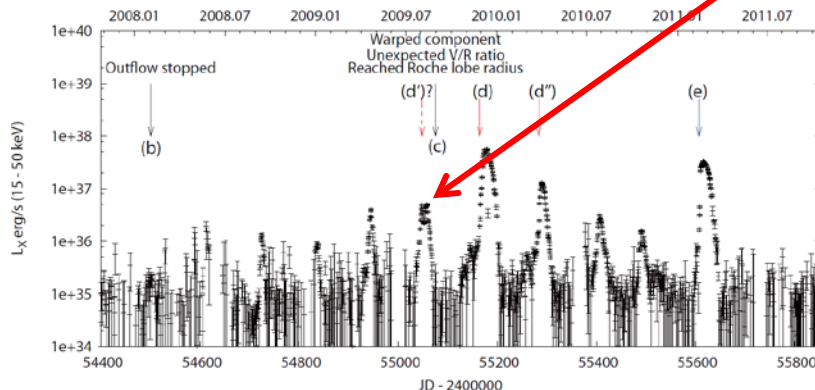
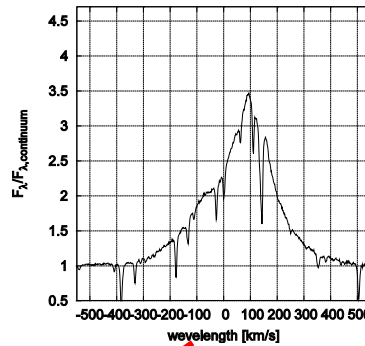
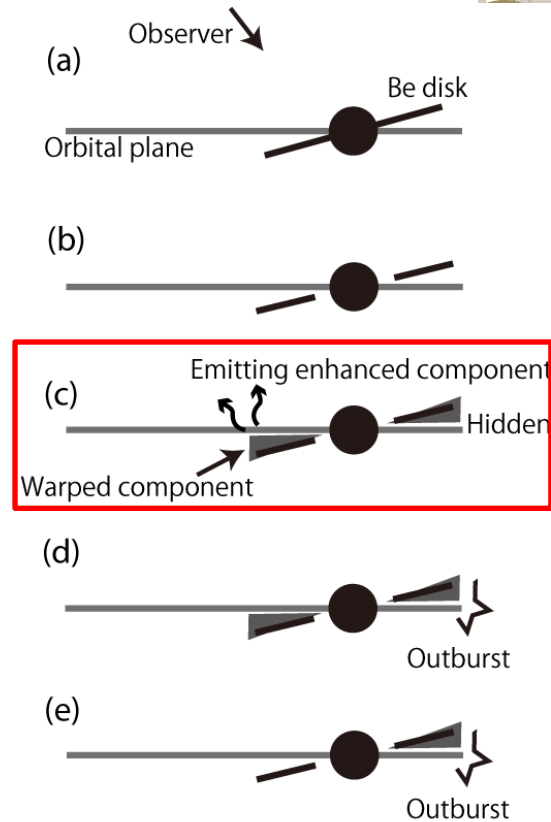
- a. 最初(2005年11月)Be星ガス円盤はKepler回転
- b. 2008年の頭に光球からのoutflow無くなる



# X線活動期のBe星ガス円盤の様子

## Be星ガス円盤、warped成分とともに順行

- 最初(2005年11月)Be星ガス円盤はKepler回転
- 2008年の頭に光球からのoutflow無くなる
- 2009年giant outburst 前、warpする
  - enhanced component

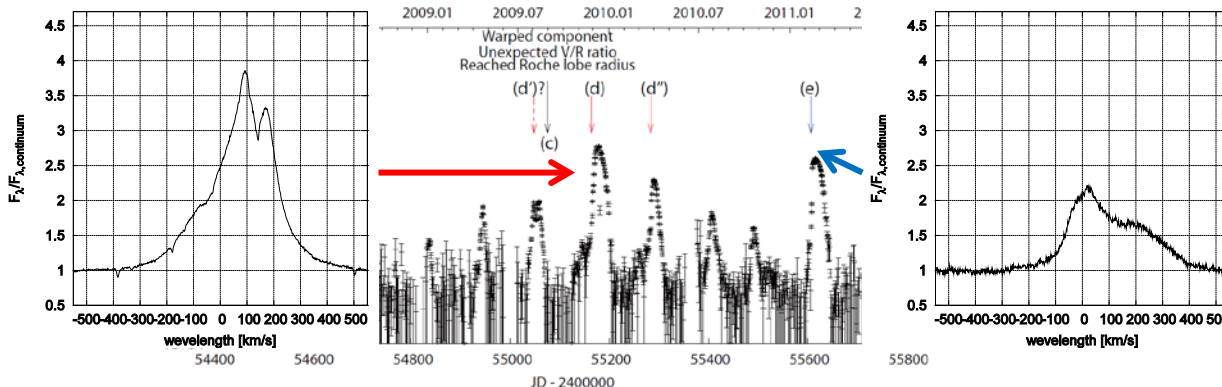
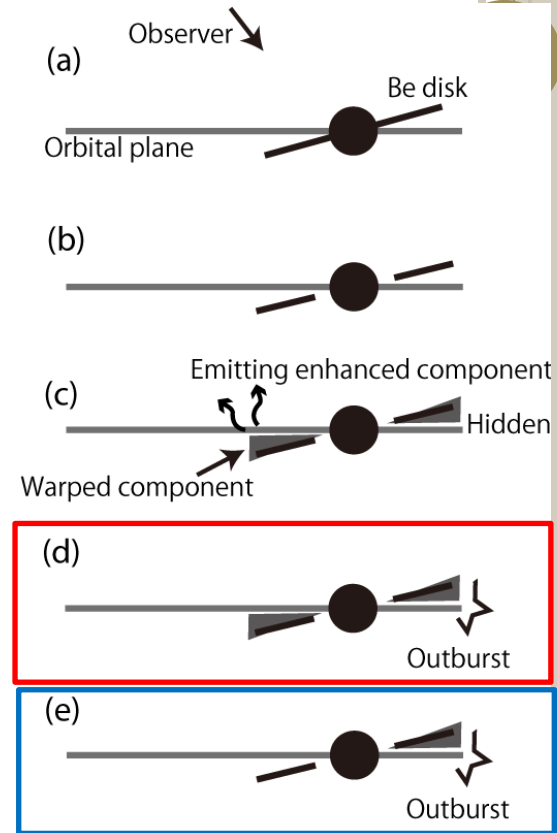




# X線活動期のBe星ガス円盤の様子

## Be星ガス円盤、warped成分とともに順行

- 最初(2005年11月)Be星ガス円盤はKepler回転
- 2008年の頭に光球からのoutflow無くなる
- 2009年giant outburst 前、warpする
  - enhanced component
- Giant outburst (2009年11月),  
Normal outburst (2010年3月)  
... 隠れたwarped成分からのガス輸送
- Giant outburst (2011年2月)  
... もう一方の成分からのガス輸送
  - No enhanced component: 隠れているから



Movie

# まとめ

- Be/X線連星A0535+262/V725 Tauを6年間モニター観測
  - 様々な時間スケールの変動を調査
  - 特に、Outburst時のBe星ガス円盤の詳細な観測
- 1. 長周期変動
  - V/R比が周期的に変動していることを確認
    - Fourier解析により周期を $500 \pm 15$ 日と同定
  - Doppler tomography法をH $\alpha$ 線/H $\beta$ 線に適用
    - Be disk 内を500日で回転している非対称な構造を可視化
- 2. X線活動期におけるBe星ガス円盤の様子
  - 2009年のgiant outburst全体をカバー
  - 近星点後に見られるH $\alpha$ 線のbright “shoulder”
    - Outburstに付随...Be星ガス円盤から中性子星に向かう濃いガス流
  - Tidally warped Be disk
    - 2009年のgiant outburst前にはwarpedしていた
    - 周期が674日でprecess (2つのケース)
    - Giant outburst: warped成分から大量のガスが輸送された