

# 連星系における Be星ガス円盤の歳差運動

岡崎敦男（北海学園大学）

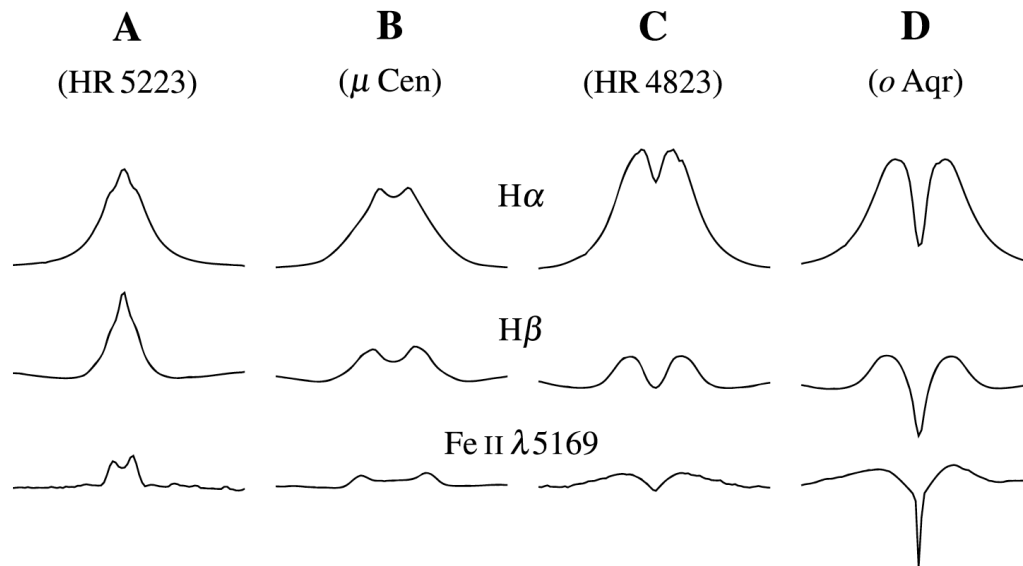
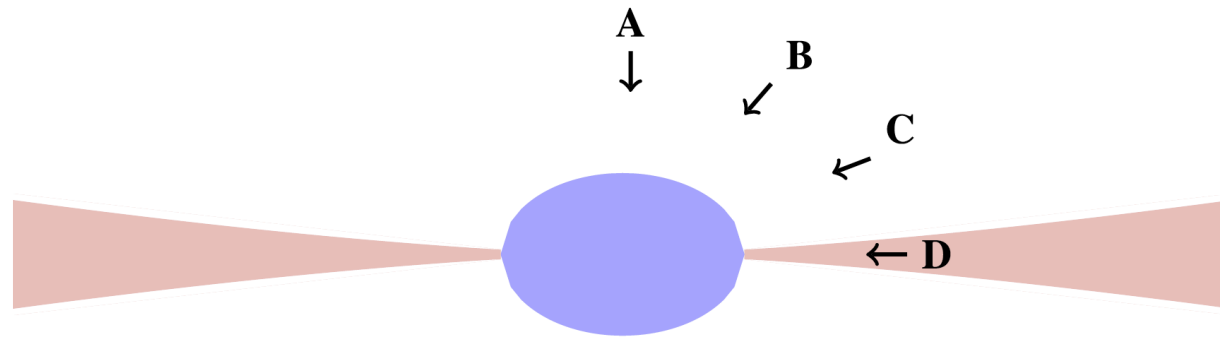
# 目次

1. Be/X線連星について
2. 傾いたガス円盤を持つBe/X線連星のシミュレーション
3. 結論

# 1. Be/X線連星

# Be星

輝線スペクトルを示す大質量星。星から放出されたガスが円盤をつくっている。



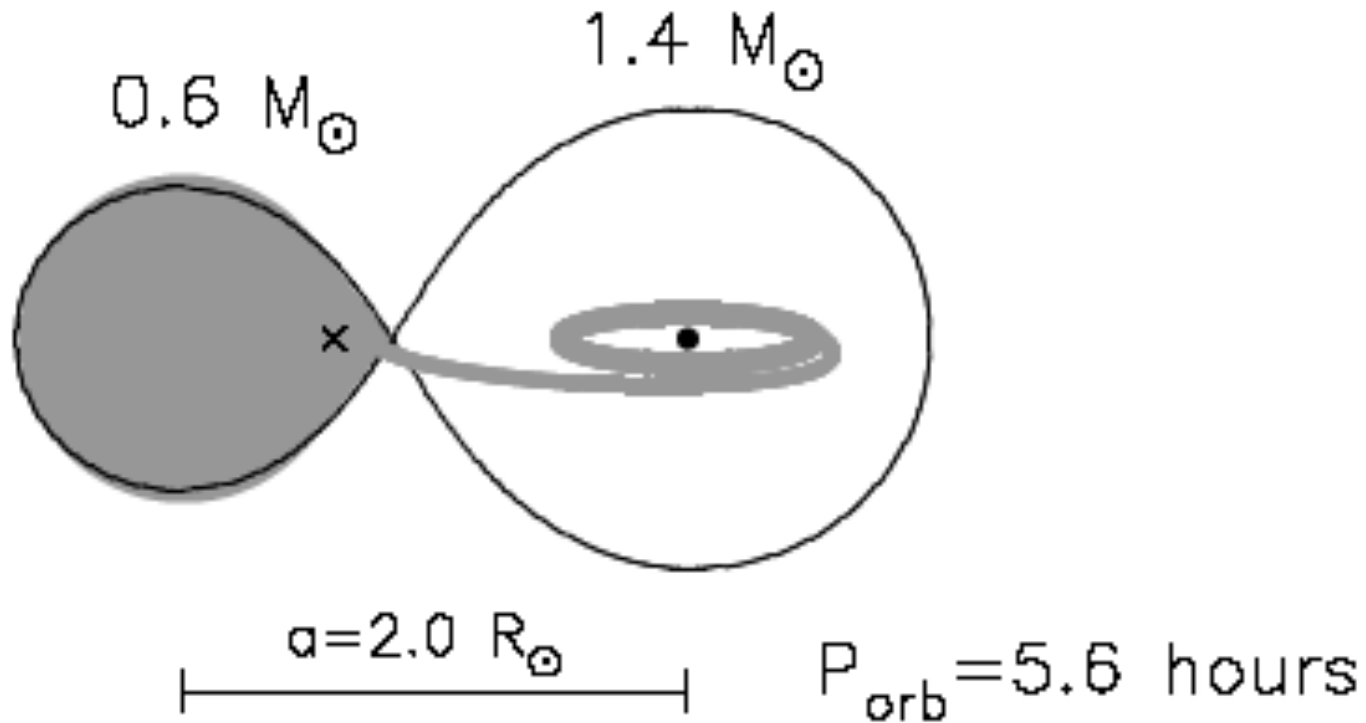
(Rivinius+ 2013)

# X線連星の分類

## 低質量X線連星

- 低質量星( $<2M_{\odot}$ )と中性子星かBHの連星

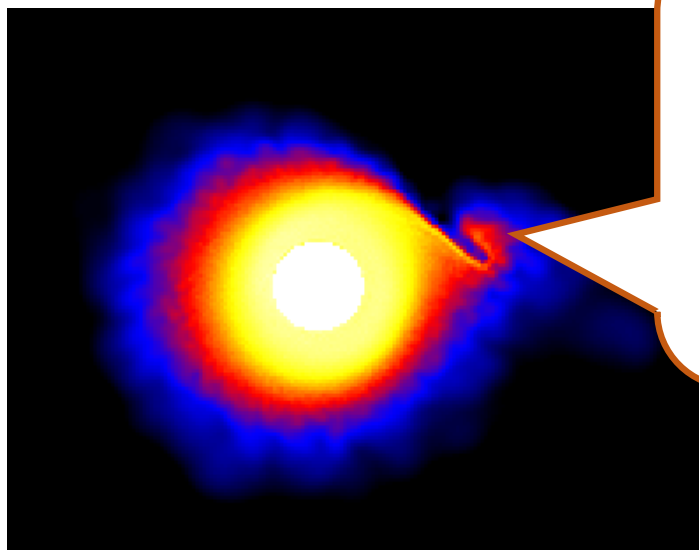
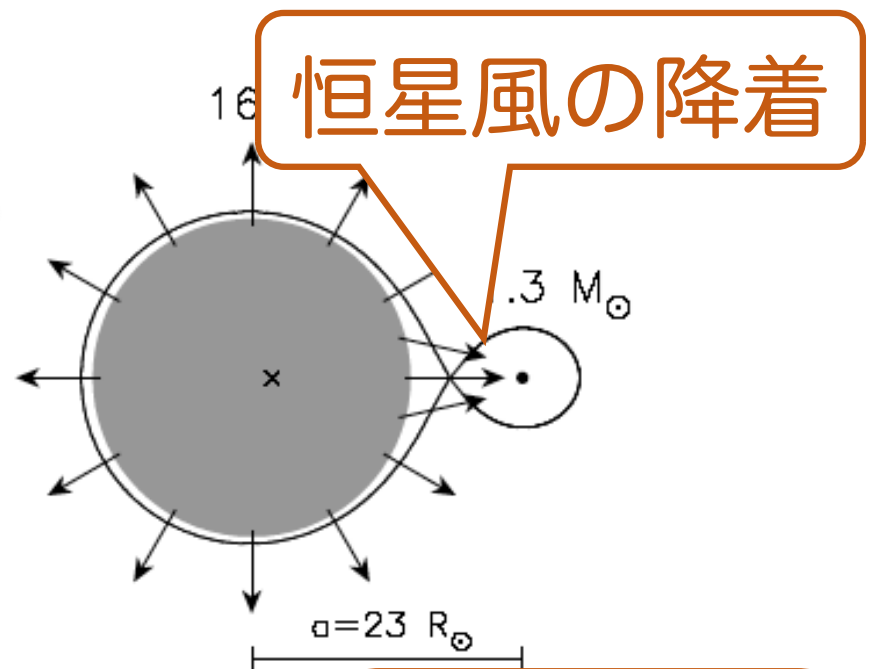
□ ツシュ・  
□ ーブから  
降着



# X線連星の分類

## 大質量X線連星

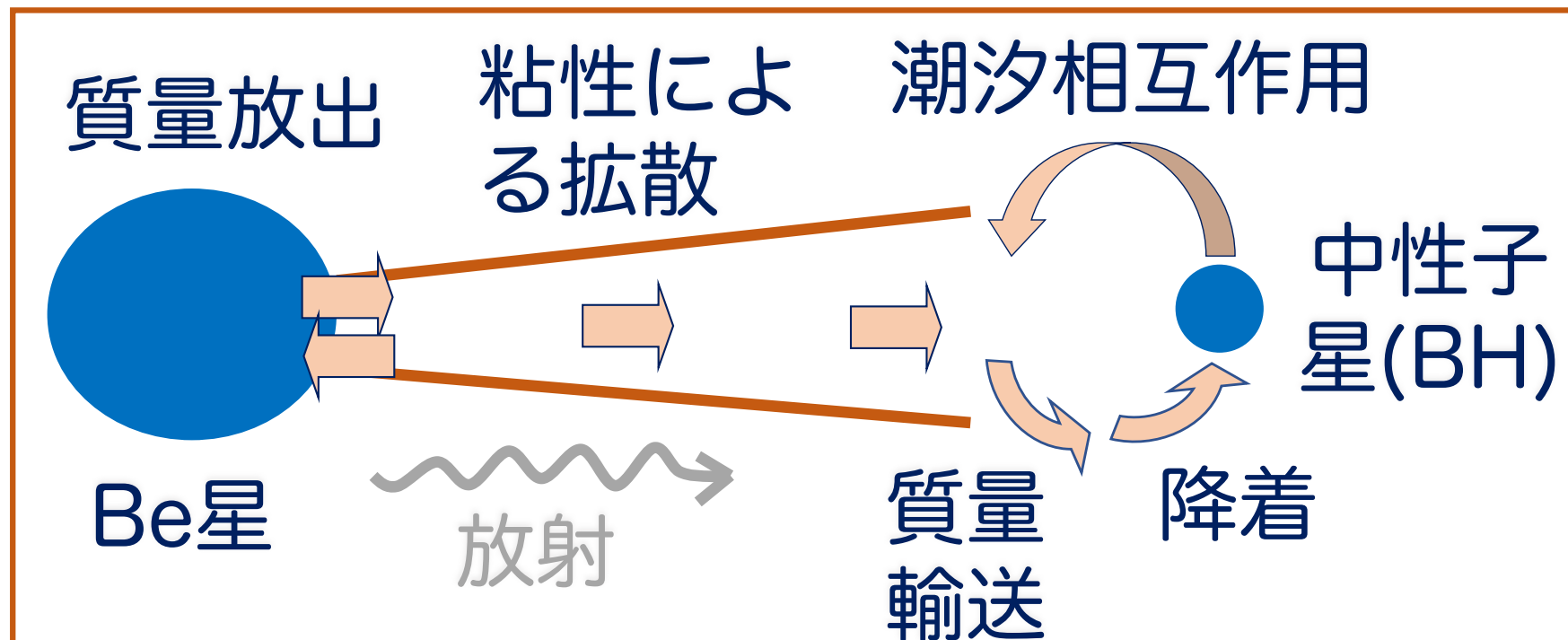
- 大質量星( $>10M_{\odot}$ )と中性子星かBHの連星
  - 超巨星X線連星 (~50%)
  - Be/X線連星 (~50%)



離心軌道の中  
性子星が  
Be星ガス円  
盤から降着

# Be/X線連星における複雑な相互作用

- 円盤は星から放出されたガスでつくられる
- X線で見られる活動は潮汐相互作用、中心星からの放射、降着機構に支配される



# Be/X線連星の示す2種類のX線増光現象

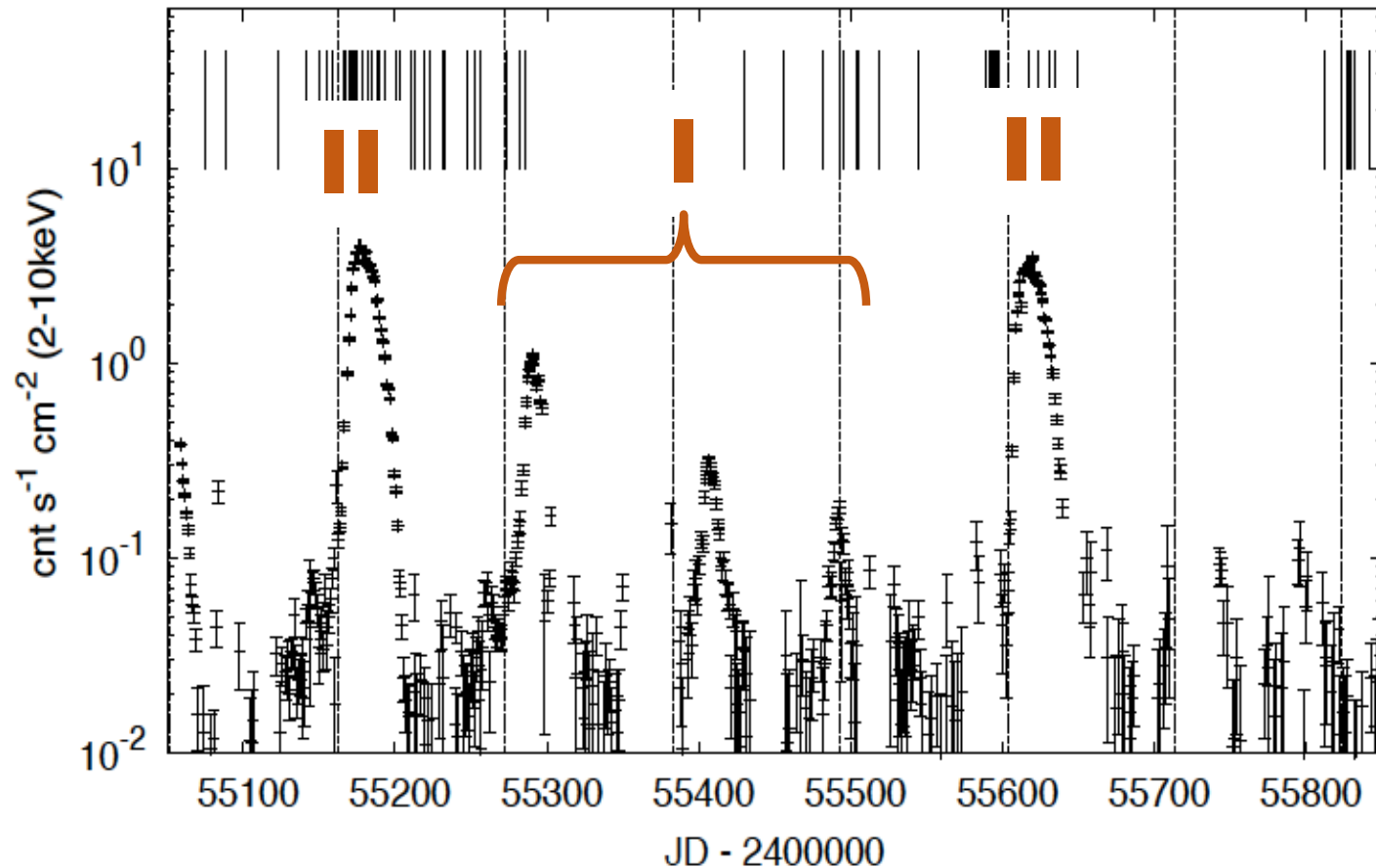
- 普通の (I型) アウトバースト
  - $L_X \sim 10^{36-37} \text{ erg s}^{-1}$
  - 軌道周期  $P_{\text{orb}}$  の間隔で起こる
  - しばしば巨大 (II型) アウトバーストに伴って起こる
- 巨大 (II型) アウトバースト
  - $L_X \gtrsim 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$
  - まれな現象。準周期的に起こる系あり。
  - その前後ではBe星ガス円盤が強く変形している (Stella+1986; Negueruela+1998)

Be/X線連星  
の最大の謎



# 2種類のX線増光現象

A 0535+262 ( $P_{\text{orb}}=110\text{d}$ ,  $e=0.47$ )



(Moritani+ 2013)

## 巨大アウトバーンを起こす仕組み (候補1)

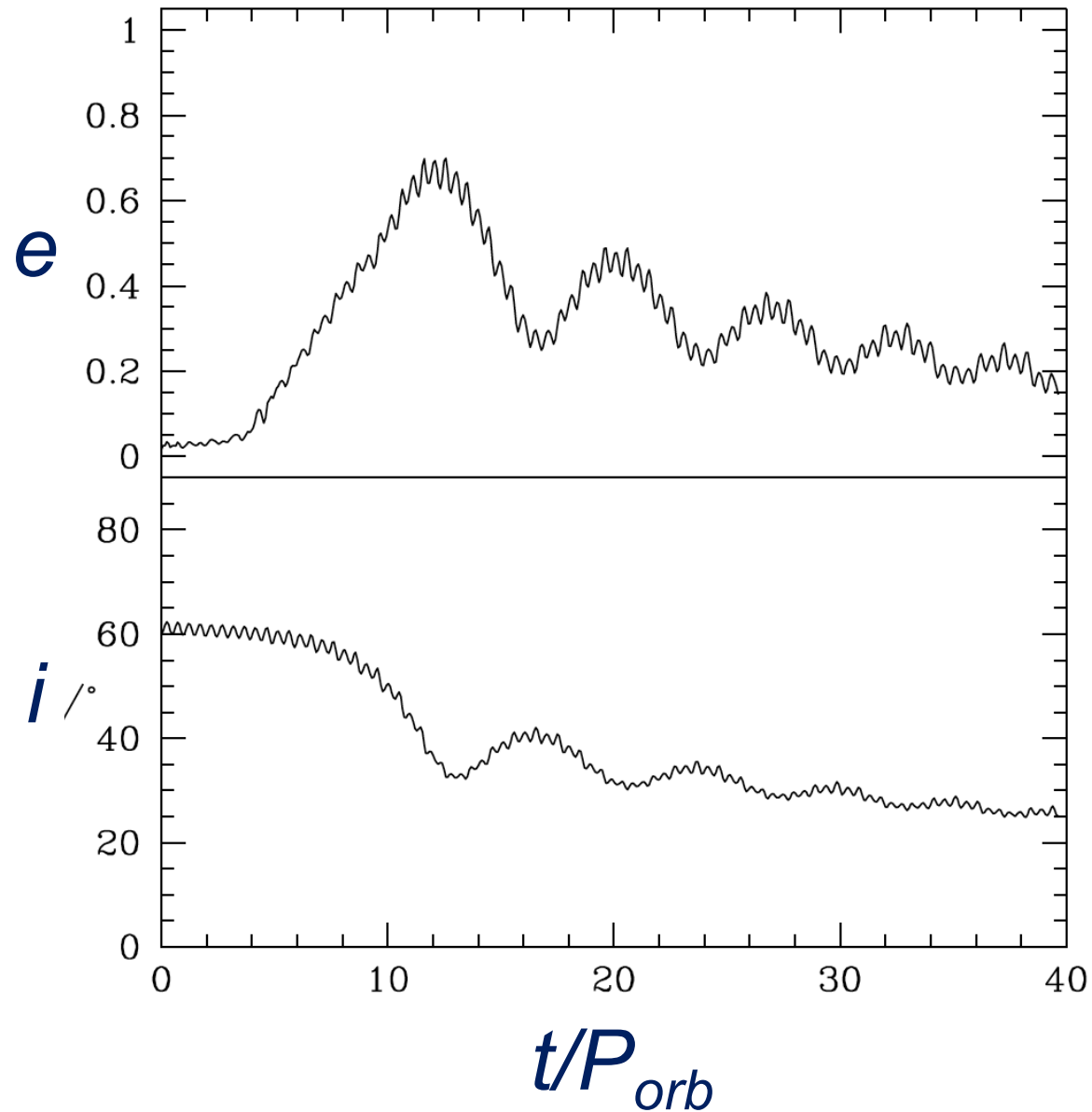
- 傾きワープしているBe星ガス円盤の歳差運動 (Moritani+ 2013)
  - Be星の放射によるトルクで歳差運動
    - ⇒ 連星の公転と同方向に進む
  - 伴星の潮汐トルクによる歳差運動
    - ⇒ 連星の公転と逆方向に進む

しかし、Be星からガスが放出され続けていると、それによるトルクが円盤をBe星赤道面に沿った方向に固定しようとするので、歳差運動が起こるかどうか明らかでない。

## 巨大アウトバーストを起こす仕組み (候補2)

- 古在機構 (Kozai-Lidov機構) によるBe星ガス円盤の振動  
大きく傾いた軌道を持つ粒子やガス円盤 (約40度以上) では、傾きと離心率が交換するように変動する。 (Kozai 1962; Lidov 1962; Martin+ 2014):
  - ➡ しかし、粘性のあるガス円盤では、KL振動は減衰振動 (Martin+ 2014; Fu+ 2015)
  - ➡ 繰り返す巨大アウトバーストを説明できない？

# ガス円盤のKL振動は減衰振動



(Martin+ 2014)

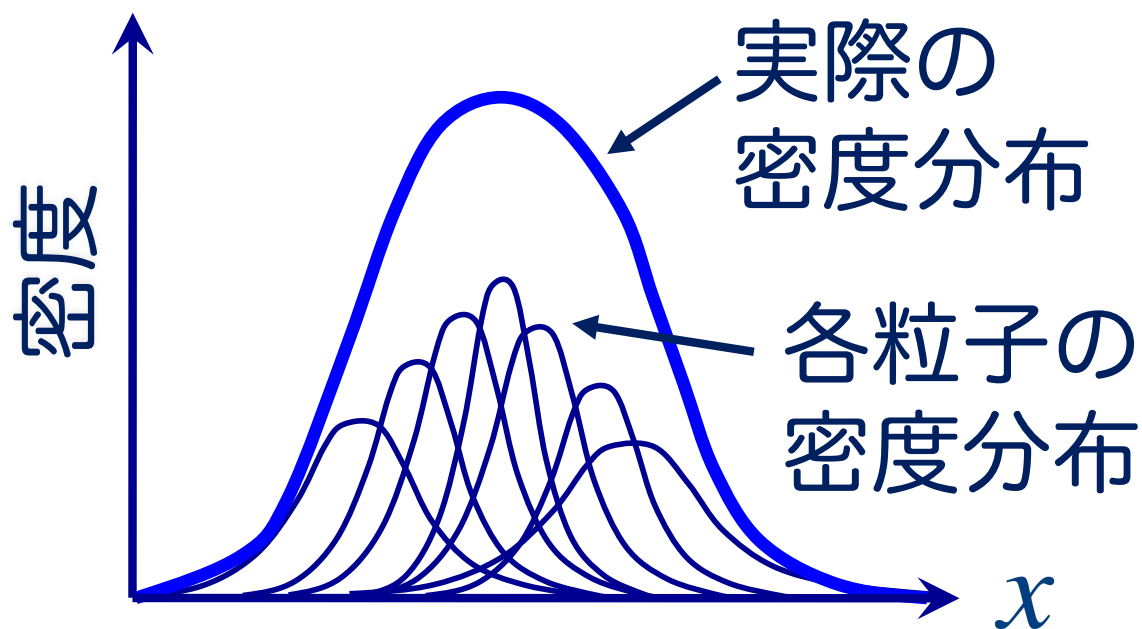
## 2. 傾いたガス円盤を持つBe/X線連星 のシミュレーション

# 数値計算方法

- 3次元SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法
- 人工粘性により、円盤中のシア一粘性のパラメータが0.1になるように近似

## SPH法

流体を広がり  
のある粒子の  
集団で表す方  
法



- Be星の回転軸が連星軌道の公転軸から大きく傾いている状態を考える
- Be星は赤道面に沿ってケプラー速度で回転するガスを放出する
- ガス円盤は等温
- モデル化する系

(1) 4U 0115+634 ( $P_{\text{orb}}=24.3\text{d}$ ,  $e=0.34$ )

巨大アウトバーストが準周期的に発生

(2) A 0535+262 ( $P_{\text{orb}}=110\text{d}$ ,  $e=0.47$ )

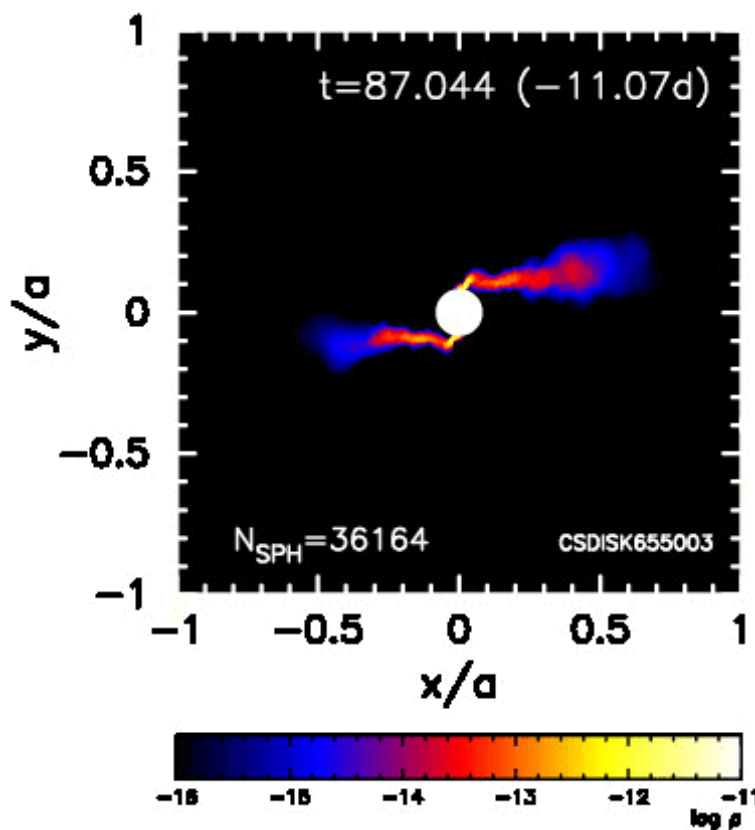
巨大アウトバーストは不規則に発生

**(1) 4U 0115+634**

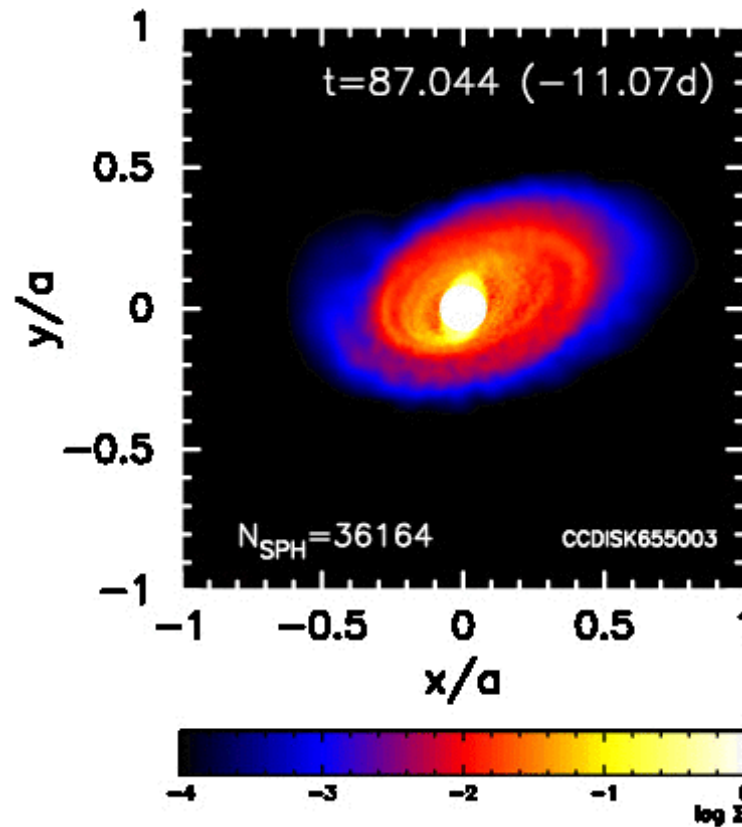


# 潮汐トルクが強くなり、円盤がちぎれ歳差運動

傾いた円盤の進化サイクル：円盤がちぎれ、歳差運動し、新しい円盤が生成・成長する



軌道面内の密度



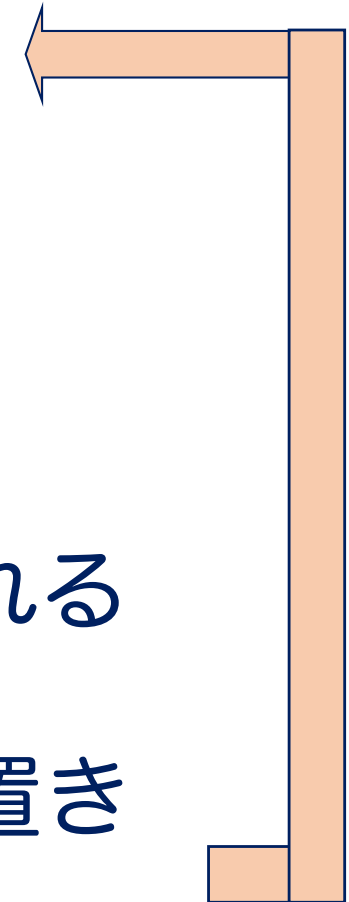
公転軸方向の  
面密度

$P_{\text{orb}}=24.3$   
d,  $e=0.34$ ,  
 $i_{\text{disk}}=60$ 度  
(短軸周り)

# Be星ガス円盤の進化サイクルの仕組み

はじめは円形の円盤が古在機構で楕円形になる

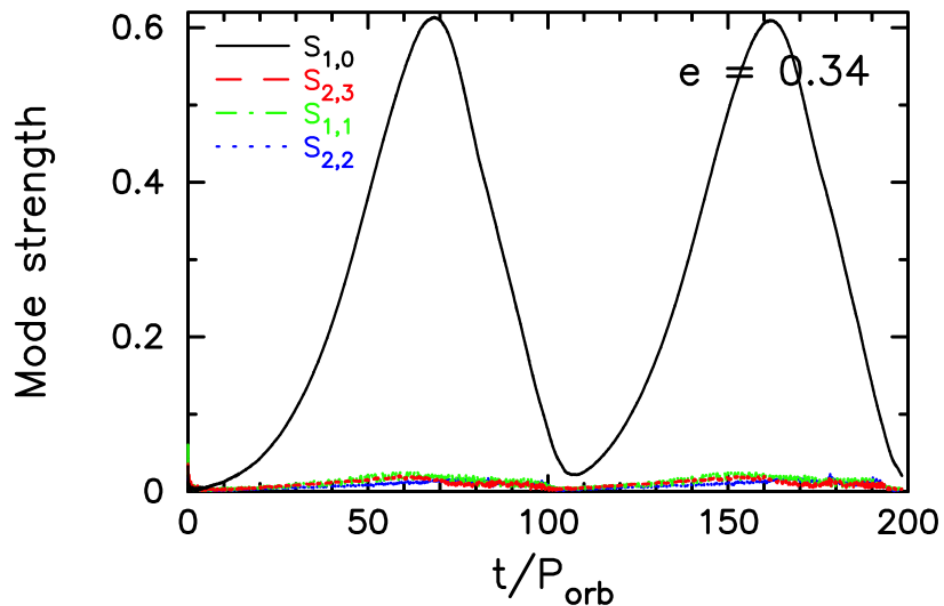
- ⇒ 潮汐力が強くなり、円盤の根元がちぎれ歳差運動する
- ⇒ 星の赤道面に新しい円盤がつくられる
- ⇒ 新しい円盤が成長し、古い円盤に置き換わる



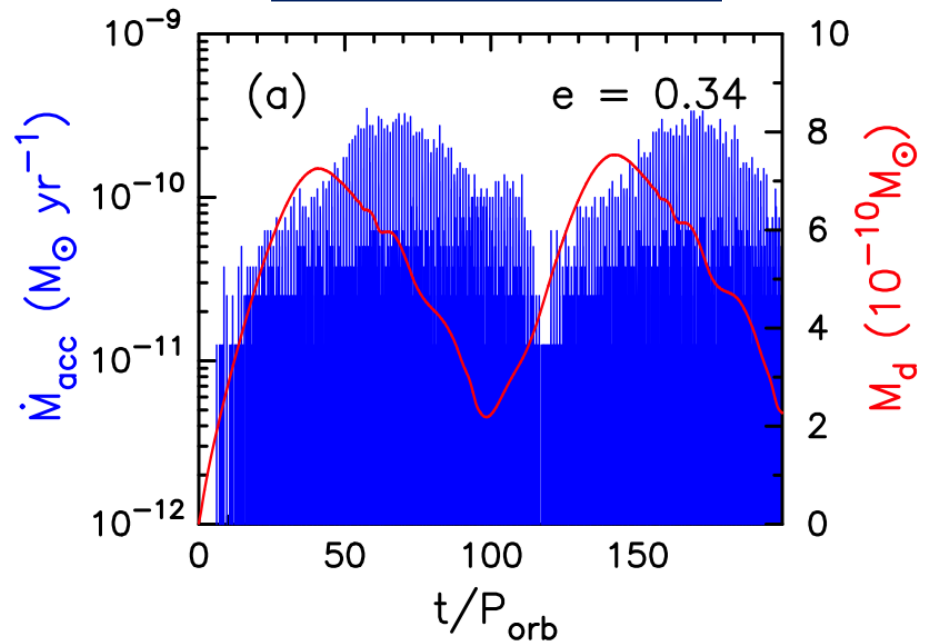
# 新しい円盤の形成がKL振動をリセット

- 質量降着率も円盤の離心率の成長とともに大きくなる

## 円盤の離心率

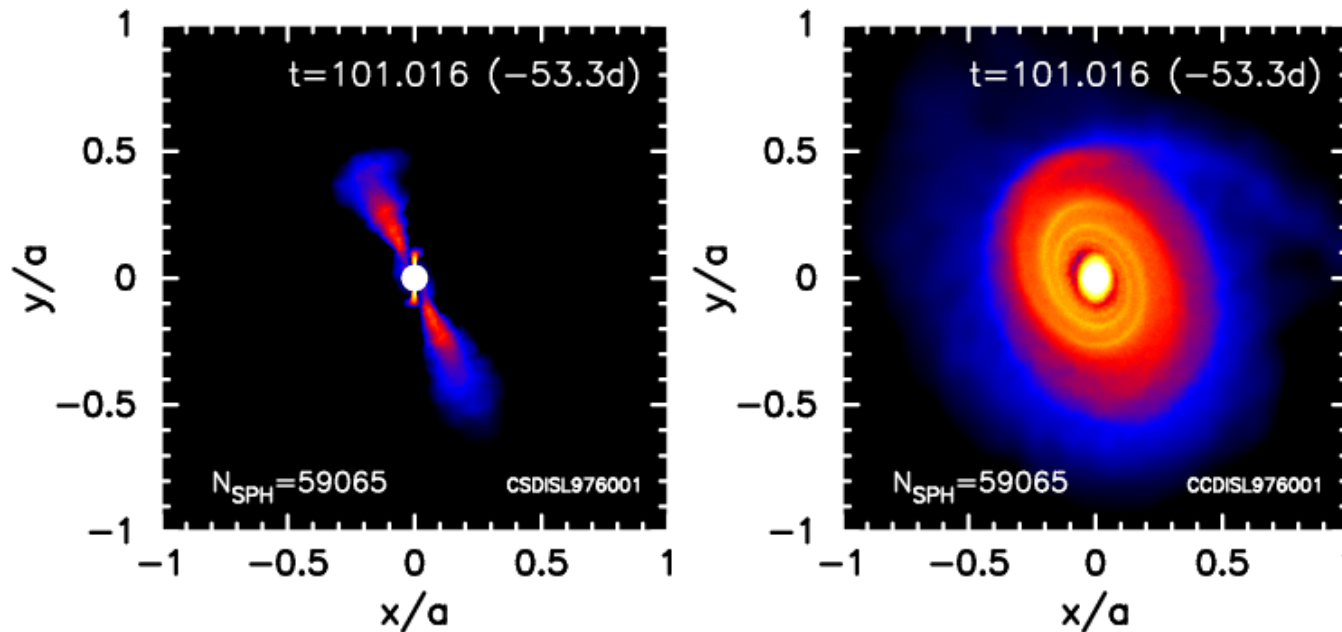


## 質量降着率



**(2) A 0535+262**

- 星からの質量放出率が一定の場合には歳差運動がおこらないが、質量放出率が大きく減少すると歳差運動が始まる
- 質量放出率が回復すると新しく円盤が成長し、古い円盤を置き換える



$P_{\text{orb}}=110$   
 $d, e=0.47,$   
 $i_{\text{disk}}=45$ 度  
 (短軸周り)

この場合は星からの質量放出のサイクルが円盤の進化サイクルをコントロール

## 二重円盤の例

### プレオネ

2005年12月

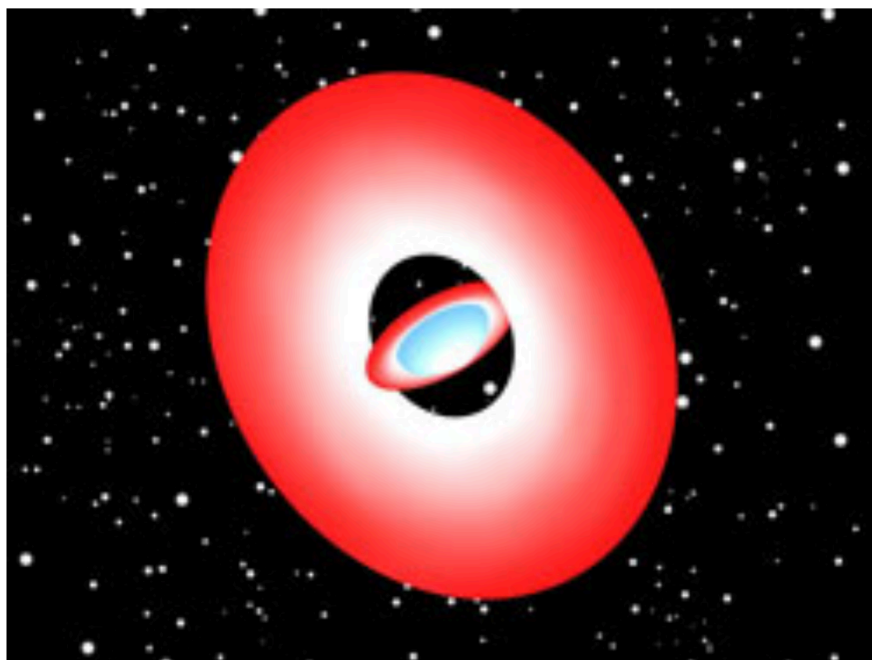


図1：2005年12月のプレオネ

2007年2月

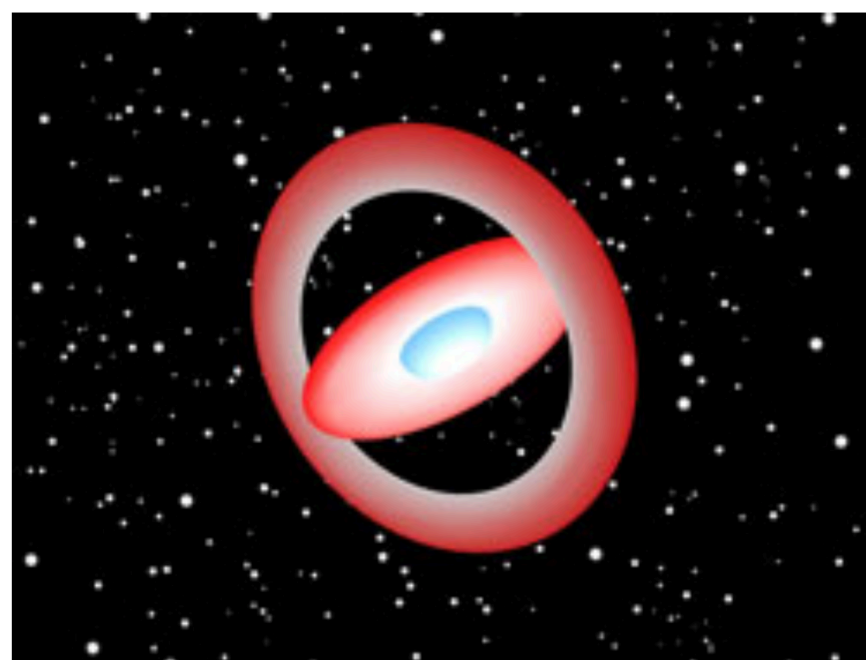


図2：2007年2月のプレオネ（図1, 2ともに提供：坂元 誠（西はりま天文台））

# 結論

# (巨大) X線アウトバーストにいたる2つの道筋

低～中離心率の系



円盤成長後、古在機構により楕円円盤へ



Be星ガス円盤の歳差運動



準規則的なX線活動



次のサイクル

高離心率の系



円盤成長後、質量放出の一時的な減少



Be星ガス円盤の歳差運動



不規則なX線活動



次のサイクルまたは  
円盤消滅



# 円盤進化サイクルに伴い予想される観測的特徴

低～中離心率の系

KL

等価幅増大、輝線の非対称性増大

高離心率の系

質量放出↓

輝線の幅の減少、可視・近赤外で減光

(二重円盤)+輝線パラメータのサイン的変動

準規則的なX線活動

不規則なX線活動

等価幅減少、対称な輝線スペクトルへ

質量放出回復すれば、可視・近赤外増光