

近接連星系の爆発モデル  
——矮新星爆発メカニズム——

尾崎洋二 (長崎大学)

目次

1. はじめに
2. 矮新星の爆発メカニズム
3. 円盤不安定モデル
4. おおぐま座 SU 型のスーパーハンプ  
とスーパーアウトバースト
5. 激変星の統一モデル
6. 降着円盤の粘性

0. 集録原稿について

今回、理論懇シンポジウムの特別講演ということで、「矮新星爆発メカニズム」について、講演いたしました。実は、日本天文学会の機関紙である天文月報の 2000 年 7 月号に同じタイトルで、今回の講演と基本的に同じ内容の解説記事を書きました。そこで、本集録については、シンポジウム当日に使った OHP の原稿をそのまま使わせて頂き、文章による記事は、天文月報の方を参照して頂きたいと思います。また、英文の解説については、やはり基本的に同じ内容の記事をアメリカの太平洋天文学会の論文誌であります PASP に 1996 年に発表しておりますので、そちらを参照して頂きたいと思います。なお、最初の章「はじめに」だけは今回の講演にあたっての話ですので、OHP そのものではなく、以下に文章として書きとどめます。

参考文献

- (1) 「激変星の研究——矮新星の爆発メカニズム」尾崎洋二  
天文月報 93 巻 pp375-388, 2000 年
- (2) "Dwarf-Nova Outbursts" Y. Osaki PASP, 108, 39-60, 1996

## 1. はじめに

まず、私が理論懇シンポジウムの世話役の方から依頼のあった特別講演を引き受けるに至った経緯からはじめたいと思います。今回のシンポジウム・全体タイトル：21世紀を迎える理論天文学の総括と展望（「観測立脚型」と「第一原理立脚型」研究の融合が生み出す新たな宇宙像の獲得を目指して）ということですが、私自身がこれまで行ってきた研究スタイルは、理論研究ではありますが、正に典型的な「観測立脚型」研究であり、このような研究スタイルの好例として、それを紹介することは有意義ではないかと思っ、引き受けることにしました。

私がなぜ「観測立脚型」研究スタイルを取って来たかということですが、それは私自身のバックグラウンドと関係があります。私は天文学科の出身ですが、この研究会参加者の多くの方が物理出身ではないかと思っます。天文学科出身の者にとっては、まず先に具体的な天体现象があり、なぜそのようなことが起こるのだろうかという形で興味を引かれて行くわけです。実際、宇宙で生起する現象は、複雑多様です。このような天体现象を物理学の第一原理から出発して、予測することは極めて難しいことです。第一原理だけからは、色々の可能性があるからで、それを一つに絞るのは難しいかと思っます。X線天文学の草分けのブルーノ・ロッシの言として「自然は、人間よりもずっと想像力に富んでいる」というのがあります（小田稔先生からお聞きした話）。1960年代のはじめ、ロッシのグループが、ロケットにX線観測装置をつんで宇宙からのX線を観測する計画を立てた時、当時の知識で予想された色々の天体からのX線の強度は測定器の感度にはひっかからないという悲観的のものでした。その時、上記のロッシの言に勇気づけられて、ロケットを飛ばした結果、予想もされなかつたX線星 Sco-X1の発見につながったものです。

今回私が与えられた講演の題は「近接連星系の爆発モデル」というものですが、実際にお話するのはサブタイトルにある「矮新星爆発メカニズム」の話です。近接連星系の爆発現象としては、矮新星爆発以外にも（1）新星の爆発、（2）X線新星の爆発現象などもあります。（1）に関しては、連星系の伴星から白色矮星へ供給された水素が白色矮星に表面で核爆発を行うもので、質量供給ということ以外では直接近接連星系が重要な役割を果しているわけではありません。（2）のX線新星の爆発現象は矮新星とは密接な関係がありますが、私より適切な方、具体的には京大の嶺重さんがいますので、私の話は矮新星爆発に限らせて頂きます。

## 2. 矮新星爆発メカニズム

矮新星は、激変星と呼ばれる爆発変光星の一種  
激変星の仲間

新星：暗い星が突然明るくなる現象      矮新星：規模が小さな新星という意味

矮新星爆発の特徴

- (1) 爆発の規模 2～5等級
- (2) 反復する爆発 繰り返しの周期 数十日

どんな星が激変星になるのか？

1950年代から60年代にかけて 激変星は、特殊な近接連星  
白色矮星と赤色矮星からなる半分離型近接連星  
軌道周期 1日以下（代表的な周期 数時間）

激変星の爆発メカニズム

激変星が、特殊な近接連星系であることが分かった60年代  
新星 白色矮星の表面での水素の核爆発

矮新星の爆発 新星の小型版で、やはり核爆発？      No!

矮新星爆発メカニズムの研究の歴史

連星系のどちらの星が爆発するのか？

60年代 伴星（赤色矮星）が増光すると考えられた

理由：ふたご座U星（矮新星の代表） 食変光星 爆発が起こると、食が浅くなり、  
極大で食が消える      → 食現象は、伴星が主星を隠す現象  
伴星（赤色星）が爆発と解釈

半分離型近接連星系の赤色星 対流外層を持つ  
質量放出 不安定

1965年 Paczynski 1969年 Bath

赤色星からの質量放出 間欠的

私自身 コロンビア大学のポストドク

1970年 ApJ に、伴星が不安定とする改良版を発表

1971年 Smak Warner & Nather

ふたご座U星の食 伴星によるホットスポットの食

軌道傾斜角  $60^\circ$  近い 主星（白色矮星と降着円盤）は食されない

→ 伴星が爆発とする根拠消える

さらに軌道傾斜角が  $90^\circ$  近い矮新星 極大時にも 食

→ 主星（白色矮星あるいは降着円盤）が爆発の原因

1973年 Bath 主星が爆発する新しいモデル

「伴星不安定」モデル

Bath 自身のモデルの改良版

伴星からの質量放出が不安定で、質量放出が間欠的に起こり、その結果、白色矮星への質量降着も間欠的になるというモデル

### 3. 円盤不安定モデル

1974年 私は、「円盤不安定」モデルを提案 PASJ に発表

「伴星から白色矮星へ向けて、一定の割合で質量供給流れてきた物質は、すぐに白色矮星へ降着せず、

円盤外縁部に溜めこまれる……矮新星の静穏期

溜めこまれた物質量がある臨界値を越えると、円盤が不安定になり、それまでに溜めこまれた物質が一気に白色矮星へ降着……矮新星の爆発時」

ししおどしモデル

1970年代後半 Bath の伴星不安定モデルと

Osaki の円盤不安定モデルの間で、激しい論争

1980年前後 降着円盤の熱不安定性の発見

蓬茨さん Meyer 夫妻

降着円盤の外縁部 温度 数千度

水素 電離水素から中性水素に変わる

降着円盤 二つの安定な状態

(1) 高温で電離した水素  $T > 10^4 \text{K}$

(2) 低温で中性水素  $T < 6000 \text{K}$

その中間の状態 (部分電離の状態) 不安定

「熱緩和振動」によるリミットサイクル

円盤不安定モデルによる数値シミュレーション

世界の5つのグループ

(1) Meyer 夫妻 (ドイツ)

(2) Smak (ポーランド)

(3) Cannizzo & Wheeler (USA)

(4) Faulkner, Lin, Papaloizou (UK)

(5) 嶺重&尾崎 (日本)

円盤不安定モデル

世界的に広く受け入れられている

1998年 10月 京都で「円盤不安定モデル25周年記念」の国際ワークショップ

出席者 国内半分、国外半分

「どうして、円盤不安定モデルを思いついたか？」

答え：当時存在した観測をよく見ると、それ以外では説明がつかない

具体的には：

静穏時には、伴星から供給された質量は白色矮星へ降着していない……

すなわち円盤外縁部に溜め込まれている

根拠：

静穏時におけるホットスポットの明るさ

系全体の明るさの半分

ホットスポットのエネルギー源…伴星から降着円盤外縁までの位置エネルギー

円盤外縁部から白色矮星への位置エネルギー その10倍

結論：静穏時には、白色矮星への降着は起こっていない

#### 4. おおぐま座 SU 型のスーパーハンプ とスーパーアウトバースト

superoutburst & superhump

おおぐま座 SU 型 矮新星のサブグループ

2 種類の爆発

- (1) 通常の矮新星の爆発
- (2) superoutburst (超爆発)  
規模も大きく、継続時間が長い爆発

さらに、superhump (超こぶ) 現象

光度曲線の周期的な「こぶ」

周期は、公転軌道周期より数% 長い

あまりに不思議な現象なので、夜もねむれない

(Warner 1985)

superhump 現象 (現象論的なモデル)

1982 年 Vogt 降着円盤 離心楕円円盤

近星点がゆっくり前進 会合周期 superhump 周期

1983 年から 84 年 1 年間 ドイツの MPA に滞在

1985 年 おおぐま座の SU 型星のモデル

“irradiation-induced mass-overflow instability”

(照射モデル) を提案

その後、私自身は (個人的には) このモデルを取り下げ

1988 年 Whitehurst 潮汐不安定性の発見

降着円盤の潮汐不安定性

降着円盤が離心楕円円盤に変形 近星点が前進

スーパーハンプ現象の説明

潮汐不安定性の研究

広瀬雅人君とハイドロのシミュレーション  
3:1のレゾナンス

1989年 スーパーアウトバーストのモデルの提案

「熱-潮汐不安定モデル」

降着円盤に起こる二つの不安定性（熱、潮汐）をカップル  
normal outburst 熱不安定のみ

superoutburst 熱不安定と潮汐不安定が同時に起こる

なぜ、このような差が出来たのか？

円盤の半径に差

スーパーサイクル 円盤半径の変化の周期

## 5. 激変星の統一モデル

統一的描像

GUT (grand unification theory)

(1) 素粒子 すべての力の統一

(2) AGN Seyfert1, Seyfert2, BL Lac, Quasar

激変星の統一モデル

パラダイム “disk instability model”

矮新星の爆発 円盤不安定モデル

矮新星のサブクラス

(1) ふたご座U型 (UG) (2) きりん座Z型 (ZC)

(3) おおぐま座SU型 (SU)

新星様変光星 (NL)

爆発現象を示さない激変星

(1) おおぐま座UX型 (UX)

(2) 永久スーパーハンパー (PS)

降着円盤の2種類の不安定性

(1) 熱不安定性

リミットサイクル S字

・  
・  
 $M > M_{\text{crit}}$  熱安定 新星様天体(NL)

・  
・  
 $M < M_{\text{crit}}$  熱不安定 矮新星

(2) 潮汐不安定性

降着円盤 離心楕円円盤 近星点の前進  
“スーパーハンプ”現象

3:1 のレゾナンス  $R_{\text{crit}} \sim 0.47$

$q \leftrightarrow$  連星の公転周期  $P_{\text{orb}}$

$q \sim 0.25 \leftrightarrow$  激変星の周期ギャップ

$q > 0.25$  潮汐安定 周期ギャップより長周期側

$q < 0.25$  潮汐不安定 周期ギャップより短周期側

“スーパーハンプ”

二つの不安定性の組み合わせ

→ 矮新星の多様性の説明可能

・  
( $\log P_{\text{orb}}$ ,  $M$ ) 図

二つの円盤不安定性に対して、安定、不安定により

4つの領域に分類

激変星

「円盤不安定性」モデルにより、統一的に理解

Dwarf Nova Outbursts 1996 PASP 108, 39-60

Invited Review Paper

## 7. 降着円盤の粘性

矮新星の円盤不安定モデルにおける降着円盤の粘性

矮新星の光度曲線の観測を再現するには：

hot state :  $\alpha_h \sim 0.2$       cold state :  $\alpha_c \sim 0.04$

粘性の起源

乱流粘性   どのような不安定性が関係しているか？

磁気回転不安定性

降着円盤のような差動回転するプラズマでは、

Balbus-Hawley instability による MHD turbulence

矮新星の爆発時 降着円盤では水素が電離

ideal MHD プラズマ Balbus-Hawley instability で

磁場はダイナモ機構により regenerate

Gammie and Menou (1998)

矮新星の静穏時(cold state) における降着円盤内では

有限の電気伝導度のため      磁場はオーミック減衰

それに伴って、粘性も減衰

Meyer and Meyer-Hofmeister (1998)

矮新星の静穏時の磁場と粘性の起源

伴星大気から運ばれてくる磁場      磁気粘性

WZ Sge 型

伴星が褐色矮星 表面温度 1000 度

電気伝導度が低い      伴星自身も 磁場を持たない

伴星からの磁場もない      極端に低い粘性

$\alpha_{cold} \sim 0.001$

爆発時

降着円盤の物質 電離 高い電気伝導度

Balbus and Hawley instability によるダイナモで

磁場が作られ、粘性も増大  $\alpha_{hot} \sim 0.2$

$\alpha_{hot} \sim 0.2$  から  $\alpha_{cold} \sim 0.001$  にどのようにして変るのか？

EG Cnc の mini-outbursts とその突然の停止

Osaki, Meyer, Meyer-Hofmeister (2001)

$\alpha$  exponential decay