

ラピッド・バースター

田原 譲・国枝秀世・他 白鳥チーム

1. はじめに

日本初のX線天文衛星「白鳥」が打ち上げられてから、すでに一年と数ヶ月が過ぎた。「白鳥」は現在も順調に観測を続けており、毎日 1200 フィートの磁気テープ 1 本分のデータを地上に送信してきている。

今年も昨年とほぼ同じコースで、銀河面に沿って衛星のスピンの軸を次々と変え、多くの興味あるX線源を観測してきた。今年のこれまでの観測で、いくつか重要なものを挙げると、X線パルサー Vela X-1 のスピン・ダウン現象、Cir X-1 のフレアー、Aql X-1 からのX線バースト、球状星団を含む新しいX線バースター、等の発見、光とX線でのX線バーストの同時観測、など多岐にわたっている。

さて、この稿を書いている8月半ばというと、ちょうど一年前にはラピッド・バースターのバースト活動を興奮して観測していた時期である。本稿では、X線バースターの中でも、とりわけ奇妙な振舞いを示すこのラピッド・バースターについて「白鳥」の観測結果を中心に述べることにする。

2. X線バーストのタイプ

ラピッド・バースターの話に入る前に、X線バースト現象について概観し、どんな点でラピッド・バースターが「とりわけ奇妙」なのかを示しておこう。

X線バーストは、ある種の星が、数 keV のエネルギーのX線領域を中心に、10 数秒間ピークで $\sim 10^{38}$ erg/sec にも達する明るさで、バースト的に輝く現象である。このようなX線バーストを放出する星(X線バースター)は、これまでに約 30 個見つかっており、銀河中心方向 30° 以内に強く集中して分布している。“ほとんど”のX線バースターに共通して、バーストは次のような性質を持っている。

1. バーストは 1 秒から数秒で立上り、ピークで $\sim 10^{38}$ erg/sec の明るさに達し、数秒から約 30 秒で消えてゆく。
2. バーストは 1 時間～1 日間隔で準周期的に繰り返される。
3. バーストのエネルギー・スペクトルは、温度が $\sim 3 \times 10^7$ °K の黒体輻射でほぼ表わすことができ

* 名大・理 Yuzuru Tawara, Hideyo Kunieda: The Rapid Burster

表 1 Type I, Type II バースターの特徴

	Type I	Type II
上昇時間	数秒以下	1 秒以下
減衰時間	3-30 秒	1-60 秒
バースト間隔	1 時間-1 日	10秒-30分
よく合うスペクトルは (最大温度)	黒体 ～ 3 千万度 冷却	黒体 ～ 2 千万度 冷却なし、 あっても僅か
ピークの光度	$\sim 10^{38}$ erg/秒	$\sim 10^{38}$ erg/秒*
バーストのエネルギー	$\sim 10^{39}$ ergs	$10^{38} \sim 10^{41}$ ergs*
半径 (黒体)	~ 10 km	~ 15 km

* 距離を 10 kpc と仮定

る。

4. バーストの後半で、X線強度が減少してゆくに付れて、この黒体の温度は低下する。

ところが約 30 個のバースターの内、1 つのバースターだけは、これと異なる性質のバーストを放出する。それがラピッド・バースターである。主な性質の違いは、

- 2'. バーストは 10^{-10^3} 秒と、非常に短い時間間隔で繰り返し放出される。
- 4'. バーストの後半での、X線強度の減少に伴う黒体の温度の低下は顕著には認められない。

などの点である。X線バースターを精力的に観測してきた MIT のグループは、これらの違いを考慮して前に述べたような性質を持つX線バーストをタイプ I バースト、後者のような性質を持つものをタイプ II バーストと呼んだ。2 つのタイプのバーストの性質を表 1 にまとめておく。

3. 「白鳥」以前の観測結果

ラピッド・バースターは 1976 年、アメリカの小型天文衛星 SAS-3 によって発見された。その天球上の位置は

$$\text{赤経} = 17^{\text{h}}30^{\text{m}}07.0^{\text{s}}, \text{赤緯} = -33^{\circ}21'17''$$

であり、銀河中心から 5.2° 離れている。赤外線観測からこの位置に球状星団が見つかった。この球状星団は、Liller-1 と呼ばれ、その距離は約 10 kpc と推定された。

球状星団では、定常X線源の存在する割合が特に高いが、そのようなX線源の半数以上がX線バースター

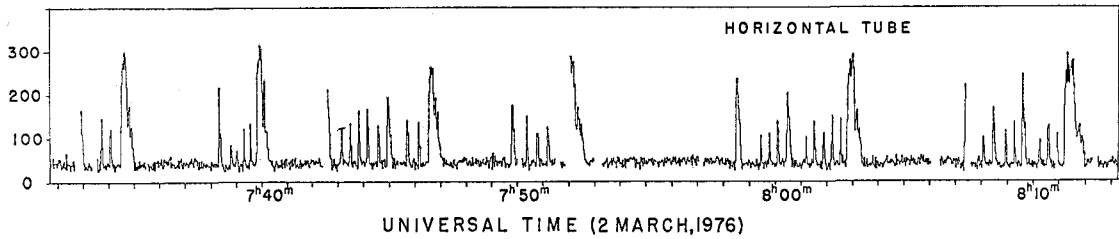


図1 SAS-3 の観測したラピッド・バースターのバースト・パターン (1976年3月)

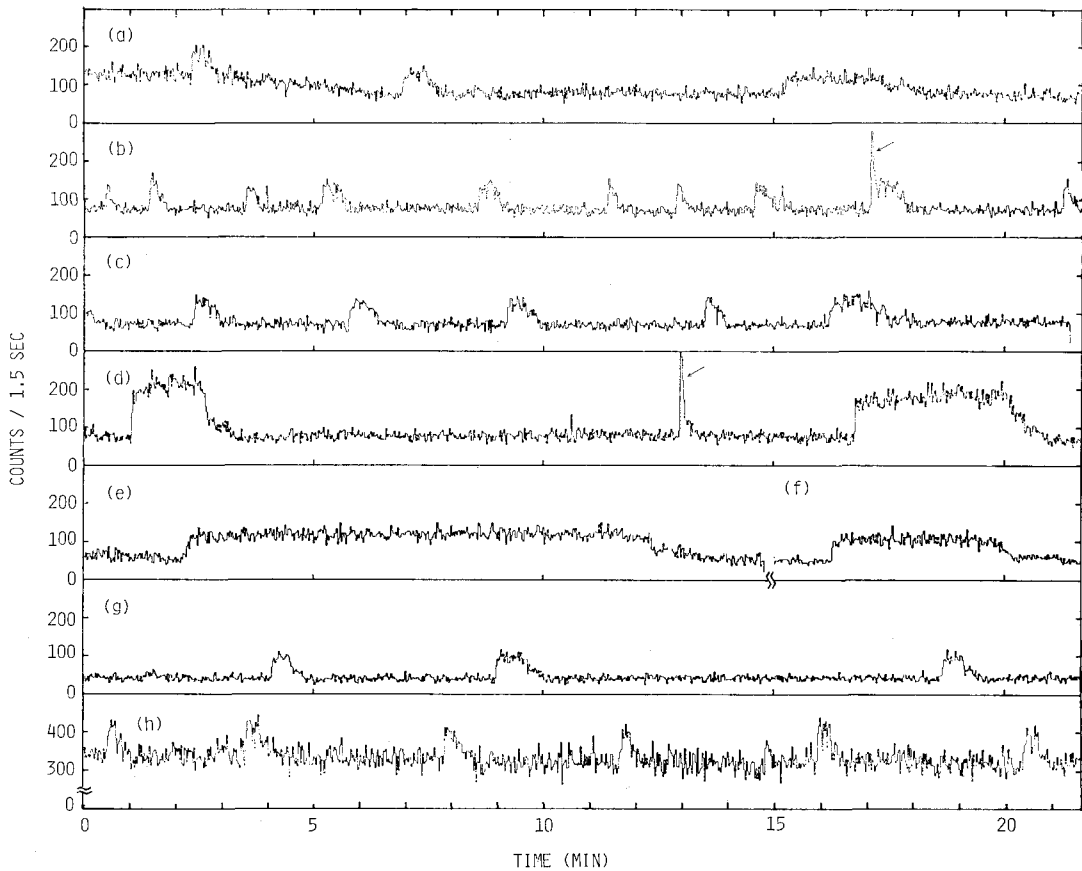


図2 「白鳥」の観測したラピッド・バースターのバースト・パターン (1979年8月)

8/8 1^h (a), 3^h (b), 5^h (c), 19^h (d) 8/11 19^h (e) 8/12 16^h (f)
8/14 17^h (g) 8/17 13^h (h)

でもあるという事実は注目すべきことである。

さて1976年のSAS-3の観測結果を図1に示す。40分程のデータの中に多くのバーストが見られるが、少し注意してみると、バーストのパターンに規則性のあることがわかる。即ち、ある1回のバーストで放出されるエネルギーは、“次に”バーストが起こるまでの時間に比例するのである。この著しい性質もラピッド・バースターが注目された理由の一つである。

ラピッド・バースターのこのようなバースト活動は、

常に起こっているわけではない。過去数年間の観測結果を総合すると、ほぼ半年に一回、約1ヶ月間バースト活動が盛んになるようである。このことは、ラピッド・バースターが、再帰型のトランジェントX線源でもあることを示す。このようなバースターとしては、他にXB 1608-522, Cen X-4, Aql X-1 などがあり、いずれも「白鳥」によってバースターであることが確認されたものである。

4. 「白鳥」によるラビッド・バースターの観測

ここでは、1979年のラビッド・バースターの観測結果を述べることにする。観測は、1979年8月8日 UT 0^hに、それまで静かであったラビッド・バースターが突然活動を開始したことを発見してから、15日間連続して行われた。この15日間に得られた有効観測時間は76時間、観

測されたバーストの総数は、約500個にものぼった。

この観測の重要な点は、バースト活動を始めた初期の状態を含めて、バースト・パターンの変化を連続して長期間観測できたこと、その結果、以前には見られなかった「強度一定で長時間続くバースト（台形バーストと呼ぶ）」が大量に観測されたこと、などである。

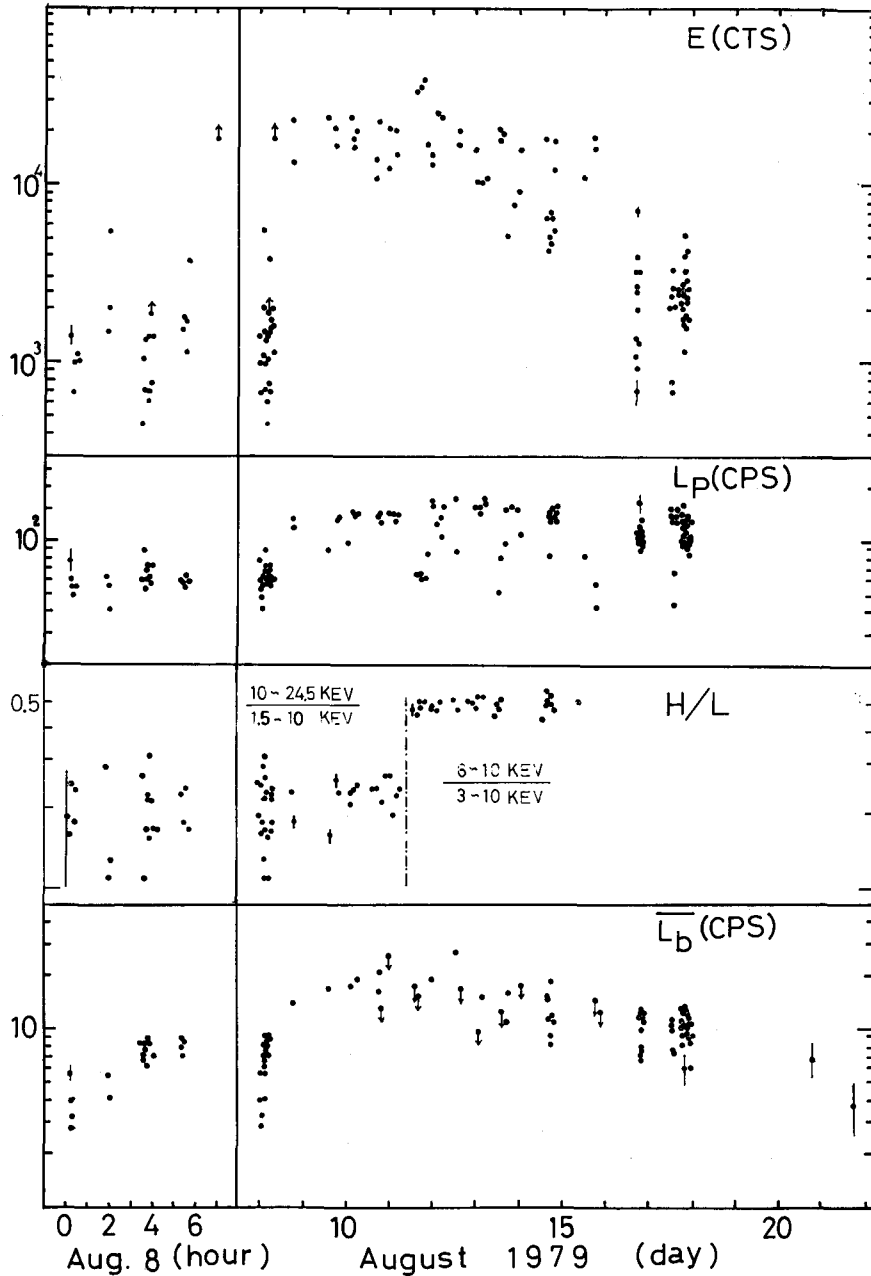


図3 バースト・パラメータの時間変化

E : バーストのエネルギー L_p : バーストのピークの明るさ H/L : 2つのエネルギー・バンドでの明るさの比 \bar{L}_b : バーストの時間平均の明るさ

(1) パースト・パターンの変化

はじめに 15 日間の観測期間中に、ラビッド・パースターがどのようなパースト活動をしたかを追ってみよう。図 2 は、この期間中のいろいろな時期におけるパースト・パターンの例である。一見して 1976 年の状態 (図 1) との相異がわかるであろう。この図からわかるように、ラビッド・パースターは 15 日間の観測期間中にそのパースト・パターンを大きく変化させている。はじめは、従来のパーストによく似た、ピークに達するとすぐに減衰を始める短いパースト (図 2-(a), (b), (c)) が中心で、その中に台形パーストが 2 例だけ含まれていた。その後パースト・パターンは劇的に変化し、以前にはほとんど現われなかった台形パーストばかりになった (図 2-(d), (e), (f))。この状態は約一週間続き、その後ははじめと同じような短いパーストのみの状態に戻った (図 2-(g), (h))。

以上の様子を個々のパーストの性質を特徴づけるパラメータの値の時間変化によってもう一度見てみよう。図 3 は、上から順に、個々のパーストの全放出エネルギー、パーストのピークでの明るさ、2つのエネルギー・バンドでの明るさの比、パーストのエネルギーを次にパーストが始まるまでの時間で平均した時間平均のパースト・エネルギーである。(この図では、それぞれ対応する X 線光子の数で示してある。) この図からは、小型のパーストから大型の台形パースト中心の状態への遷移は、数時間でおきていること、パーストのエネルギーと時間平均のパースト・エネルギーとは変化の幅を別にすると同期して増減していること、などがわかる。

(2) 台形パースト

ラビッド・パースターの過去の観測では、急速な立上りと、ピークに達してからすぐに減衰をはじめる、持続時間が約 30 秒までのパーストが主であった。これに対しピークに達したのち、一定の強度を保って輝くのが台形パーストである。実は、台形パーストは、1979 年 3 月、即ち「白鳥」の観測の半年前に、SAS-3 によって最初に発見されている。しかしこの時は、パースト活動初期に 2 例見られただけで、「白鳥」の観測では約一週間にわたって主要なパターンとして現われたのである。

台形パーストの典型的な例を図 4 に示す。台形パーストの持続時間は、強度一定が顕著になる数 10 秒から最高 10 分にまで及んでおり、対応する全放出エネルギーは、 $5 \times 10^{39} \sim 5 \times 10^{40}$ ergs にもなる。(ただし距離を 10 kpc と仮定する。)

パーストの減衰時間は 30~60 秒で、図 4 にみられるように、この減衰部分に X 線強度の“コブ”が現われるのは、多くの台形パーストに共通の特徴である。

また、図 4 を少し注意深くみると、パーストの前後で

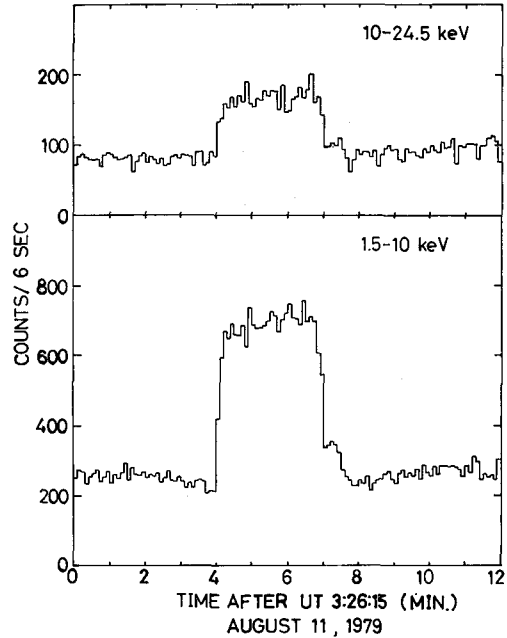


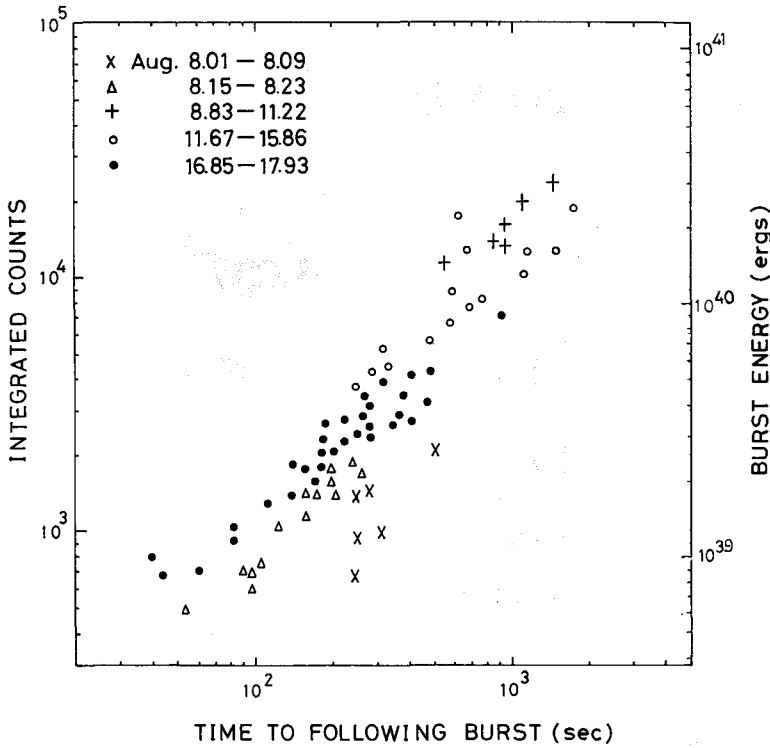
図 4 典型的な台形パーストのタイム・プロフィール

一分程、バック・グラウンドの強度が減少しているように見えることがわかる。これは、「ラビッド・パースターはパーストを放出していない時でも定常的に X 線を放出しており、この成分はパーストの前後で減少 (あるいは休止) する」ということを意味しているように考えられる。

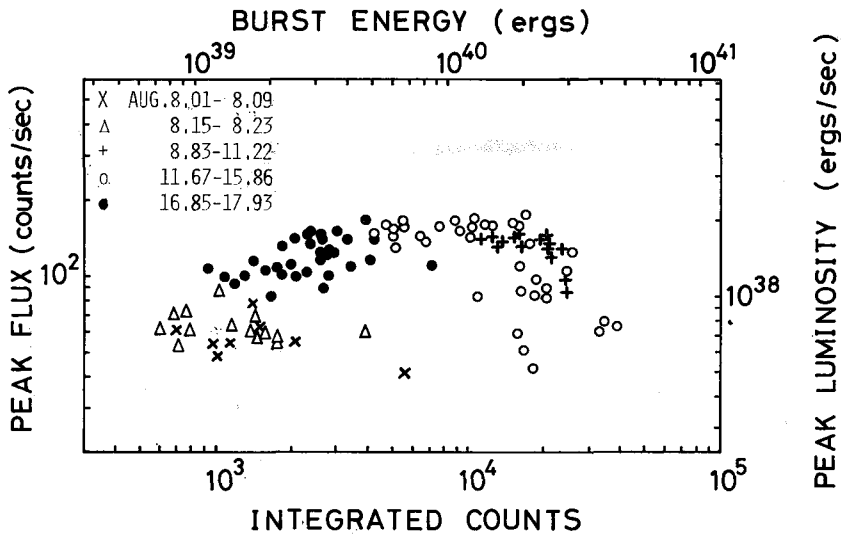
実際スタレ・コリメータのついたカウンターのデータを解析することによって、パーストを放出していない時にも、弱い X 線が放出されていることがわかった。この定常成分の強度は 8 月 8 日~10 日の間で平均して $\sim 2 \times 10^{37}$ erg/sec で、パーストのピーク強度のほぼ 1/10 であり、また台形パーストの時間平均強度にほぼ等しい。

さてすでに述べたように、パーストのエネルギーと、次にパーストが始まるまでの時間とは、ほぼ比例していたが、「白鳥」の観測データについてこの関係を調べたのが図 5 である。図中に (x) で示されている最初の 2~3 時間のデータを除くと、台形パーストを含めて広いダイナミック・レンジでこの比例関係が成立していることがわかる。このことは台形パーストが従来の短いパーストの延長上にあることを意味している。

台形パーストに関する性質でもう一つ重要なのは、パーストのピークの明るさについてである。図 6 にはすべてのパーストについて、パーストのエネルギーとピークの明るさとの関係が示されている。この図からは、パーストのピークの明るさが、全体で 4 倍ほど変化していること、パーストのエネルギーが $\sim 2 \times 10^{40}$ ergs 以上にな



◀ 図5 “バーストのエネルギー”と“次にバーストが始まるまでの時間”の関係



▼ 図6 バーストのエネルギーとバーストのピークの明るさとの関係

ると、ピークの明るさは減少する傾向があること、などがわかる。

5. ラビッド・バースターの理論的なモデルへのアプローチ

現在X線星の多くは、コンパクト星を含む近接連星系を成していることがわかっているが、ラビッド・バースターを含めて、X線バースターからは、パルス成分や食現象の存在といった、コンパクト星や連星系の直接の証

拠は得られていない。しかしバースト発生域の大きさの推定値(約 10 km)とバーストの明るさ(〜10³⁸ erg/sec)とは、バースターが恐らく中性子星を含む近接連星系を成しているであろう、ということを示唆している。

現在タイプIバーストに関しては、Joss によって提案された、中性子星表面でのヘリウムの熱核反応の暴走モデルが有力である。この理論の有力な根拠は、X線バースターの放出している定常X線の強度とバーストの時間平均の強度との比 α をうまく説明できる点にある。

観測的には α は数 10~数 100 の範囲にあるが、この理論では、 α は単位質量当りの中性子星表面で解放される重力エネルギーとヘリウムの核融合反応で生じる核エネルギーとの比で表われ、その値は ~ 100 となるからである。

第3節では述べなかったが、SAS-3 の観測によると、ラピッド・バースターはタイプ I バーストも放出するとされており、タイプ II バーストとタイプ I バーストの時間平均強度の比は 130 であった。又ラピッド・バースターでは定常 X 線成分とタイプ II バーストとはその放出過程に強い関連（バースト前後での定常成分の休止）があった。この2つの事実は、タイプ II バーストが他のバースターの定常成分に対応するもので、何らかの機構で中性子星への物質降着が非定常的に生じているのではないかということを示唆している。

現在このような考え方で、強い磁場を持った中性子星に降ってきた物質が、一度磁場で止められ蓄積していった後、レイラー・テイラーの不安定性が生じて中性子星表面にまで落ち、重力エネルギーを解放してバーストを生じる、というモデルが出されている。現在のモデルでは、ラピッド・バースターの重要な性質が、定性的にも十分説明されているとは言えないが、このような描像をもとにして、モデルを考える上で基本的な問題について検討してみることにする。

問題は大きく2つに分けられるだろう。1つはバーストのエネルギー源である降着物質を蓄積する“溜”の構成とそこに生ずる不安定性の問題、もう1つは、X線放出領域の構成の問題である。

前者に関しては、I) 「白鳥」の観測で得られた最大のバーストのエネルギーに対応する質量 ($\sim 10^{21}$ g) まで蓄積できること、II) バーストのエネルギーと、次のバーストまでの時間が比例する機構、III) 定常 X 線成分が、台形バーストの前後で休止する機構、IV) バースト・パターンを大きく変化させている原因、などが説明される必要があり、また後者に関しては、V) バーストのエネルギー・スペクトルの形、VI) バーストの減衰部分で温度の低下が見られない理由、また、もし磁場が強いならば、VII) なぜパルス成分が観測されないのか、などが基本的な問題であろう。

一方、台形バーストにみられる一定の X 線強度を実現する機構 (VIII) は、前者と後者の接点の問題である。この最後の問題に関しては、星の定常的な放射強度の上限 (= エディントン限界光度) を与える機構が考えられる。この上限は重力と放射圧の釣り合いによって決まる値で、単純な球対称の放出の場合は、星の質量だけで決まってしまう。台形バーストのピークの強度は全体で 4 倍近く変化しているから、この機構が働いているとして

も、X線の放出は少なくとも球対称ではない。

仮に、“溜”から X 線放射領域への一定の割りあいの質量供給が実現している、これが台形バーストの一定強度を作り出しているとすれば、上に示した II), III), IV) の問題を統一的に扱うための次のような“現象論的モデル”が考えられる。即ち、i) “溜”には一定の割り合い (\dot{M}) で物質が流入しており、一部は蓄積し ($\dot{M}/2$)、一部はそのまま流れ出して中性子星に落ち定常 X 線となる ($\dot{M}/2$)。ii) 物質がある一定のレベル (M_0) まで蓄積すると、“溜”の中の物質が一部 (ΔM) だけ $5\dot{M}$ の割り合いで放出され、定常 X 線の 10 倍の明るさのバーストとなる。iii) i) \leftrightarrow ii) の状態間の切換えには約 1 分かかり、この間 X 線の放出は止まる。iv) バースト放出がおこるレベル M_0 はバーストの時間間隔に比べ十分長い時間スケールで \dot{M} の変化に対応して増減し、 ΔM の分布を変える。

このような描像によって、例えば II) の性質は、次のように説明される。即ち ΔM の質量に対応するエネルギー E のバーストが生じると、次のバーストは再び溜が元のレベル M_0 になるまで起こらない。この待ち時間 Δt は放出した質量 ΔM を“一定”の蓄積率 $\dot{M}/2$ で補給する時間であり、($\Delta t = \Delta M / (\dot{M}/2) \propto \Delta M \propto E$) 結局 E に比例する。

6. おわりに

「白鳥」の観測結果は、ラピッド・バースターのバースト活動が、極めて多様な変化を示すことを明らかにした。しかしその実体はいまだに多くの謎に包まれている。他のバースターと共通の多くの性質を持っているにもかかわらず、なぜラピッド・バースターだけがこのような特異な振舞を示すのか、という素朴な疑問に答えるにも、さらに観測、理論両面の発展が必要だろう。

「白鳥」は、今年もすでに、ラピッド・バースターを含む領域で X 線バーストの観測を続けてきている。現在までのところ、バースト活動は起きていないようであるが今年も、赤外線、光、X 線での同時観測も予定されており、新しい成果が期待される。

最後に、3節では省略したが、1979年のラピッド・バースターの X 線での活動期に前後して赤外線の波長域でバーストが見つかったという報告があった。しかし X 線のバースト中、赤外での増加は特に見られなかったという観測もあり、1980年の観測は、この点に関しても新たな情報を引きだしてくれるものと期待されている。