

「はくちょう」による MXB 1636-53 の観測

大 橋 隆 哉*

1. はじめに

昨年 2 月に「はくちょう」が上がってから、早一年が過ぎようとしている。その間に「はくちょう」は小型衛星の機動力を生かして、主に X 線バーストの観測に予想外ともいえる多くの成果を挙げることができた。ケンタウルス座の X 線新星からの大バーストの発見、銀河中心付近の「珍獣」ラビッド・バースターからの風変わりな X 線バースト群、光と X 線の同時バーストの観測、等々数え上げればいくらでもありそうである。これらのトピックスのいくつかは、まもなくこの天文月報の紙面を借りて、シリーズ的に紹介されるだろう。

今回は、MXB 1636-53 という X 線バースターに話題を絞って、「はくちょう」の観測から一体何が判ったのかを簡単に紹介しよう。というよりもむしろ、調べれば調べる程、判らないことがいよいよ増えてきたと言った方が適切かもしれない。それ程 X 線バーストとは奇妙な現象なのである。このバースターに関して特筆すべき成果は、光と X 線による同時バーストが観測されたことである。バースターという特異なシステムの正体を解明する上で、光/X 線バーストは貴重な情報を与えてくれる。その結果も合わせて紹介する。

尚、「はくちょう」に搭載された X 線検出器や観測方法については第 73 卷 2 月号に、又 X 線バースト現象とそのモデルに関しては第 73 卷 4 月号にそれぞれ紹介されているので参考して頂きたい。

2. 1636-53 からの X 線バースト

図 1 に示すのが、昨年「はくちょう」が観測した、1636-53 からの X 線バーストである。実際には 4 月から 7 月にかけて、総数 44 個のバーストが捉えられたが、ここでは 1636-53 が検出器の視野の中心近くにあった時期の 15 個が示してある。それぞれのバーストについて、エネルギーの低い（軟い）X 線と高エネルギーの（硬い）X 線で見た強度の時間変化がプロットされている。(a) から (o) までの記号の横の数字は、バーストが発生した時刻を世界時で表してある。例えば 621-0016 は 6 月 21 日 0 時 16 分というわけである。

この図を一見して誰もが（?）感じることは、実際に様々な形のバーストが発生するものだということである

う。1 秒以内にピーク強度に達するものもあれば、5 秒以上もかかるまでダラダラと強度が増加し、減衰するのに 30 秒近くかかるものまで多種多様である。しかし、個々のバーストの間に、共通の性質や法則性が全く無いのかというと、決してそうではない。第一の重要な共通点は、常に硬い X 線の方が軟い X 線より速く減衰するということである。これはタイプ I バーストすべてに見られる性質である。因みに、ラビッド・バースターの出すタイプ II バーストにはこの性質がなく、硬い X 線も軟い X 線も同じように減衰する。硬い X 線の方が速く減衰するという事実は、エネルギースペクトルが刻々と変化するからに他ならない。これは X 線が熱いプラズマの熱輻射により出る時には、プラズマが次第に冷えていくことを示している。実際、過去のいろいろな衛星の観測から、X 線バーストのエネルギースペクトルは一般に黒体輻射と良く一致することが知られている。従って、第一図に示した 15 個のバーストは全て、突然発生した高温プラズマが、黒体輻射によって徐々に冷えていったという物理現象を反映しているわけである。黒体輻射というスペクトルの性質から、さらにバーストについて多くの知識が得られる。それらは次の節で述べる。

図 1 の中に、極めて形の良く似た 4 個のバーストがある、(a), (c), (g), そして (j) のバーストである。この 4 個のバーストは最もシャープな形を持つことが特徴的だが、面白いことに形だけでなくピーク強度も良く一致している。先に 1636-53 は様々な形のバーストを出すと書いたが、このシャープな形だけは良く覚えているようである。しかもこのシャープな形のバーストのピーク強度は、15 例中最も高い。エディントン限界のような、X 線強度の上限が存在していて、それがバーストの形に関係していると考えれば、極めて興味深い結果である。この図では、X 線のカウント数で示してあるが、黒体輻射というスペクトルを使うと、カウント数からエネルギー フラックスを計算することができる。エネルギー フラックスに直して比較すると、(h) のバーストもピークでは上の 4 つのバーストと同じ値、約 6×10^{-8} erg/cm² sec を示す。これも輻射強度の上限に達しているのではないかと想像することができる。実は、今年観測された 1636-53 からのバーストについて、同じ解析を行なったところ、13 例中 4 例がほぼ同じピーク強度を示し、しかもそれより高いピーク強度をもつバーストは一つもないことが判った。もちろん今後の観測で例外が見つかる可能性は

* 東大宇宙研 Takaya Ohashi: Observation of MXB 1636-53 from HAKUCHO

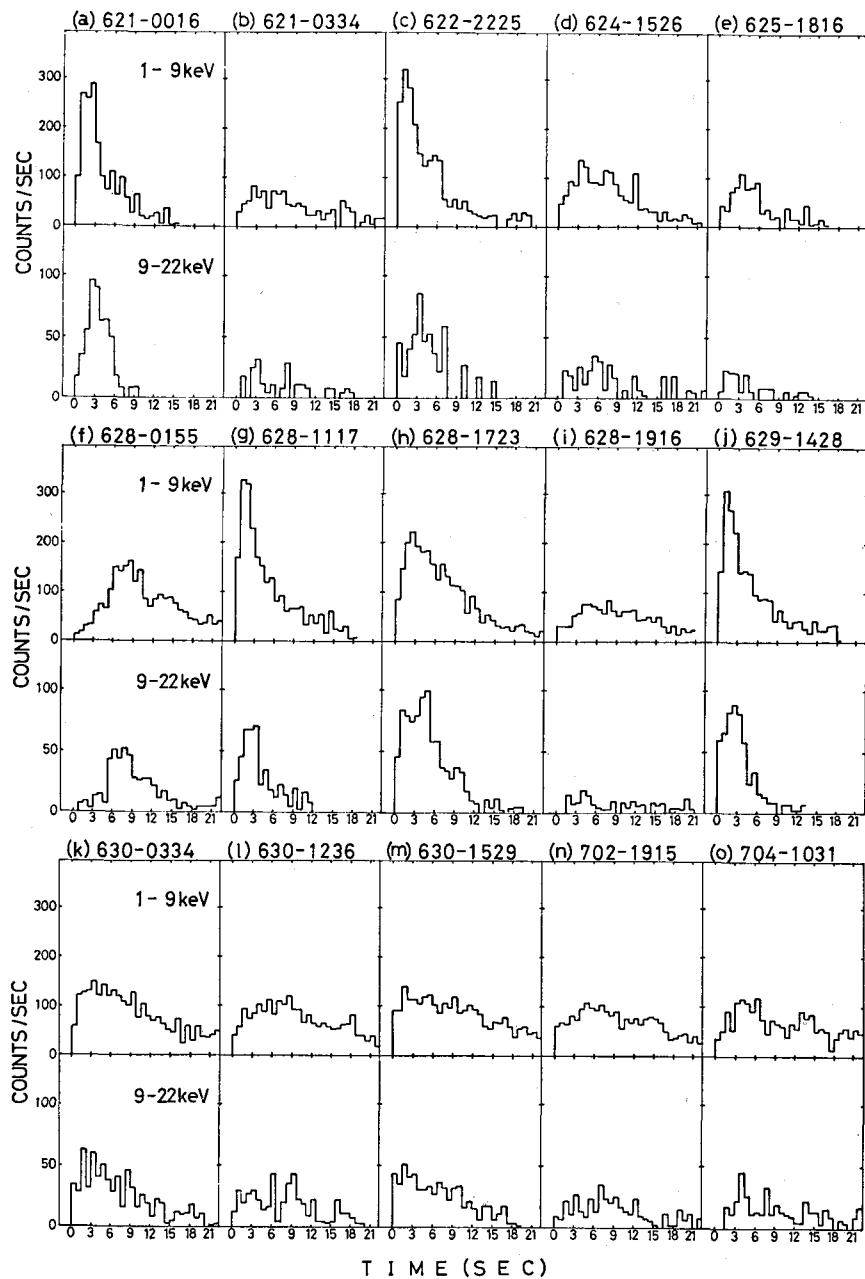


図 1 MXB 1636-53 から観測されたX線バースト。

あるが、少くとも現時点では約 6×10^{-8} erg/cm² sec という値は輻射強度の上限値を強く示唆しているように思われる。

因みに、この 6×10^{-8} erg/cm² sec というエネルギーーフラックスが、中性子星のエディントン限界に達していると仮定すると、バースターまでの距離を求めることができる。中性子星の質量を太陽の 1.4 倍とすると、エディントン限界は約 2×10^{38} erg/sec ので、1636-53 までの

距離はざっと 6 kpc となる。従って銀河中心よりずっと太陽系に近い所にいるらしいと考えられる。

3. 輻射領域の広がり

先程いきなり中性子星が登場したが、これは決して根拠の無い仮説ではない。X線バースト現象に中性子星が関与していると考える重要な根拠は、輻射領域の広がりが、半径 10 km 程度の極めて小さな領域であるという

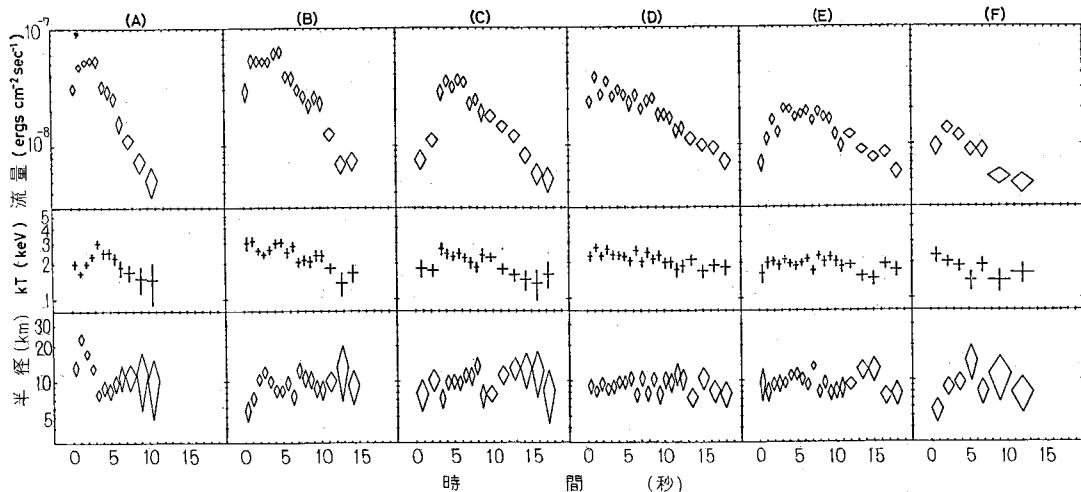


図 2 バーストのエネルギー・ラックス、温度・輻射領域の半径。

事実である。この点に関して 1636-53 からの様々なバーストについての解析結果を次に紹介する。

図 1 に示した 15 個のバーストを、バーストの強さや形の似たものを集めて 6 グループに分類する。次に統計精度を良くするために、同じグループに属するバーストは重ね合わせを行なって、合計 6 個の「複合」バーストを作る。前に触れたように、X 線バーストは黒体輻射のスペクトルを持つことが判っている。この場合、硬い X 線と軟い X 線の強度の比から黒体の温度を計算することができる。また温度を使えば、カウント数をエネルギー・ラックスに直すことができる。更に、黒体輻射のエネルギー・ラックスは、温度の 4 乗と輻射領域の表面積に比例するので、バースターまでの距離を適当に仮定すれば、バーストを発生している領域の表面積が得られるというわけである。

こうして 6 個の複合バーストについてそれぞれ、エネルギー・ラックス、黒体の温度、輻射領域の半径（球面上で一様に輻射した場合）の、時間変化を調べた結果を図 2 に示す。（図中、温度の単位 1 keV は約 1 千万度に対応する。）ここで半径を計算する際に、1636-53 までの距離は 10 kpc と仮定した。もし距離が半分なら、輻射領域の半径も半分になる。この図を見てすぐ気のつくことは、(A) から (F) までの複合バーストのどれもが、バーストの減衰部分では必ず、輻射領域の半径が約 10 km に固定されているのである。バースト毎に、その形は捉えどころのない変化を示した。ところがこうした解析によって、それらは全て同じ領域から輻射されているらしいことが、浮き彫りにされるというのは極めて興味深い。

半径 10 km、或いはそれ以下という大きさは、通常の

星はもちろん白色矮星よりもずっと小さいが、中性子星として考えられている大きさに極めて良く一致する。これは 1636-53 だけでなく、他の数個のバースターについても既によく調べられており、全て半径 10 km 程度の領域でバーストがおきていることが判っている。バースト現象が発見された当初は、巨大なブラックホールが関与しているとするモデルも提唱されたことがあったが、現在ではこの結果から、おそらく中性子星がバーストをおこすのであろうと信じられている。そうすると X 線バーストを手掛りにして、中性子星というものを詳しく調べることができるはずである。中性子星がどのようにして作られたのか、その正確な大きさや温度、磁場等を知る上で、X 線バーストをより精密に観測することは、極めて意義が大きい。

それでは何故バーストの形はこのように大きく変化するのだろう。X 線バーストのモデルとして、中性子星表面での核爆発が考えられていることは、既に 73 卷 4 月号で紹介された。しかし現在の核爆発モデルでは、このようにバラエティに富むバーストの形を、すっきり説明することができない。核爆発モデルが本当に正しいのかどうかを含めて、バースト現象を理解することはまだ今後に残された課題である。

4. 光/X 線バースト

我々の銀河系に属する X 線源の多くは、近接連星であることが知られている。連星を作っている片方の星が、白色矮星、中性子星、或いはブラックホールのような高密度星になっていて、相手の星から供給されるガスを、強い重力で吸い込む際に高温に加熱して、X 線を放射するわけである。このような近接連星を光や X 線で見る

と、連星系の回転周期に応じて、X線や光の強度が周期的に変化したり、食をおこすことが判っている。ところがバースターからは、食や周期変化が観測されない。X線の強度は変動するのだが、極めて不規則で、詳しく調べても周期性が見つかないのである。先にバーストは、中性子星が関与する現象であることが判ってきたと述べたが、それではバースターは、中性子星を含む近接連星なのだろうか。仮に近接連星であるとしても、X線や光の周期変動が見つからないのは何故だろう。このようなバースターというシステムの謎を解く上で、重要な手掛りを提供するのが、光/X線同時バーストの観測である。

光とX線によるバーストの同時観測は、「はくちょう」以前にも、米国の SAS-3 衛星による 2 個の観測例があるが、いずれもバーストの規模が小さすぎて、確かなことは判っていなかった。「はくちょう」と MIT グル

ープ、南米 ESO 天文台の協力により、昨年 6 月から 7 月にかけて 1636-53 の共同観測が行なわれ、光/X線同時バーストを 5 個も捉えることができた。その結果の一部を図 3 に示す。この図で上のグラフが、地上の 1.5 m 望遠鏡が観測した光のバーストで、下の 2 つが同時刻に「はくちょう」がキャッチした X 線バーストである。特に右側の 6 月 28 日に観測されたバーストは、かなり規模の大きなもので、これの解析からいろいろ興味深い事実が判ってきた。

X 線バーストが黒体輻射のスペクトルを持つことは既に述べたが、数千万度という温度の黒体輻射で可視光がどの程度放射されるかは、簡単に計算できる。ところがバーストそのものの黒体輻射から期待される、可視光の強度を計算すると、観測された光のバーストの強度より 6 衍も 7 衍も小さくなってしまう。光のバーストが強すぎるるのである。従って光バーストは、本来の X 線バース

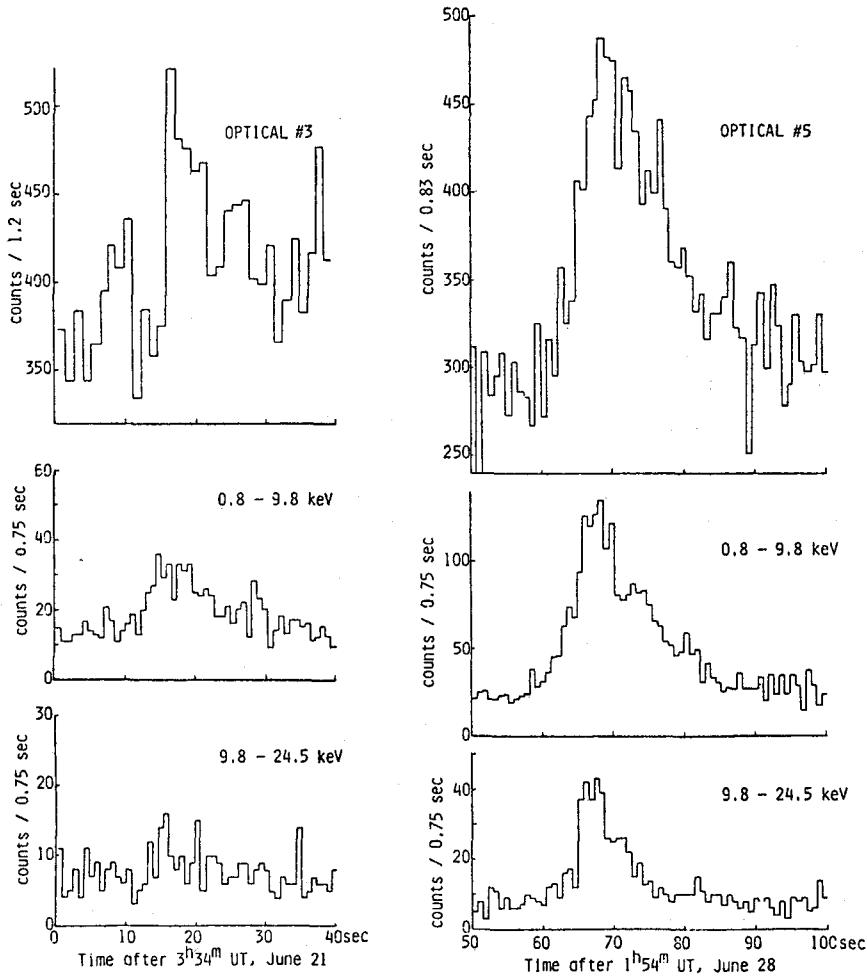


図 3 光/X線同時バースト。左は 1979 年 6 月 21 日、右は 6 月 28 日に観測された。

トとは別に、二次的に発生したものと考えざるを得ない。恐らくバーストを発生する中性子星の近傍に、何らかの物質が存在していて、そこで一旦 X 線が吸収された後、可視光として再放出されると考えられる。

そこで X 線と光双方のバーストを比較すると、光バーストは X 線バーストより 2~3 秒遅れて始まることがわかった。これは中性子星の表面で放射された X 線が、物質に到達し可視光に変換されて再放出されるまでに、数秒を要することを示している。光バーストを出す物質は中性子星から、光の速度で数秒の距離にいるらしい。更に、図 3 を見てすぐ気のつくことは、光と X 線のバーストの形が、極めて良く似ていることである。立ち上がりや減衰の時定数を比較してみても、1 秒と違わない程度に両者が一致している。もともとシャープな形をもった X 線バーストでも、一旦物質に吸収され、光に変換されて放出される間に、その形はなると予想される。その要因としては、一つは物質の幾何学的な広がりが考えられるし、もう一つは X 線の吸収から光の再放出に到るまでの、プロセスを要する時間が考えられる。従って観測結果の意味するところは、X 線から光への変換のプロセスが極めて速く、しかも光バーストを出す物質の広がりが小さいということである。

中性子星で発生した X 線バーストが、物質により光バーストに変換される様子を、図 4 に模式的に示す。この物質は中性子星周辺からの定常 X 線により、加熱されているだろう。ここで物質が仮に黒体輻射によって、エネルギーを発散しながら平衡状態が保たれていると考える。バーストが発生すると、物質に入射するエネルギーが数 10 倍に増加するが、この時には物質が黒体輻射で逃がすエネルギーも、数 10 倍になってバランスが保たれる。黒体輻射で放出されるエネルギーは、温度の 4 乗に比例する。ところが可視光の領域は、黒体輻射のエネルギースペクトルの低い方の一部だけ（レイ

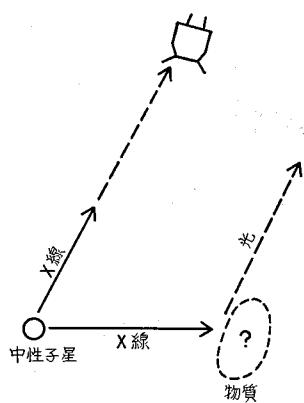


図 4 光バースト発生の模式図。

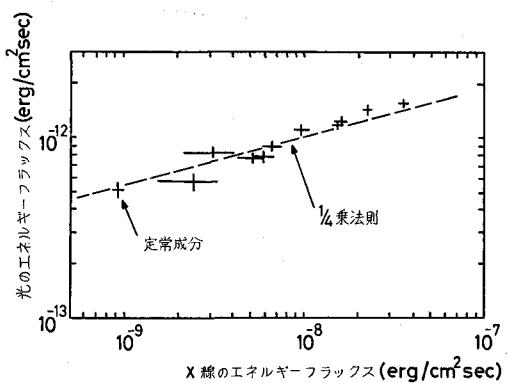


図 5 バースト中の光と X 線のエネルギー フラックスの関係。

リー・ジーンズ領域）をカバーしていると考えられるので、この場合観測されるエネルギー フラックスは、温度の 1 乗に比例する。つまりもとの全輻射エネルギーの、 $1/4$ 乗に比例した量が観測されるわけである。そうすると例えば、バーストの時に X 線の強度が 16 倍に增加了した時には、光の強度は $1/4$ 乗の 2 倍にしか増えないはずである。

図 5 は、6 月 28 日のバーストについて、光と X 線両者のエネルギー フラックスの刻々の変化を示したものである。但し、光バーストは X 線バーストに比べて 2, 3 秒遅れるとして、その補正が入っている。この図で見事に示されているように、定常成分・バースト中を通じて、光の強度は X 線強度の約 $1/4$ 乗という関係に従って変化している。このことから、上に述べた黒体輻射の仮定が良く成り立っていると考えられる。重要な事は、この関係が成立する以上、1636-53 からの光は、定常成分もバーストも、その殆んどが X 線をプロセスすることによって作られているということである。しかも可視光は定常成分もバーストも同一の物質から発せられると、考えねばならない。光バーストを発生する物質の正体は、まだ明らかではない。それは自分自身では極めて暗い晚期型星かもしれないし、中性子星を取り囲むガスディスクであるかもしれない。それは今後も光/X 線バーストを数多く観測することによって、遠からず明らかにされるだろう。

5. おわりに

「はくちょう」の観測は、今日も続いている。1636-53 についても、既に今年 30 個近くのバーストが観測された他、光/X 線バーストも数個捉えられた。ここで紹介した観測結果についても、今後の解析から新しい重要な事実の判ることが数多くあるだろう。それらについても、適当な機会にまとめて紹介したい。