

あすか

## 飛鳥でみたSS 433

## —銀河系最強のジェット・エンジン—

小谷 太郎

基礎科学特別研究員

〈理化学研究所 宇宙放射線研究室 〒351-01 和光市広沢 2-1〉

e-mail: kotani@riken.go.jp

謎のジェット天体 SS 433 を飛鳥で観測したところ、ジェットからの赤方／紫方偏移した2本の鉄輝線を検出した。これはX線では見えないと信じられてきたものであり、これまでの推定「X線ジェットは千万キロメートルより短い」を否定する証拠である。3年にわたる観測から、ジェットの温度、密度、射出質量などが決定された。SS 433 はどうやらかつての想像以上に強大なジェットと莫大な質量流出を持つ、激しい系らしい。

## 1. ジェット天体 SS 433

## —謎と言われて20年—

SS 433 は数十億度の高温プラズマを光速の0.26倍で噴射しているジェット天体である。図1(表紙)にSS 433のX線写真を示す。ジェット物質が東西に噴射されているようすが見てとれる。図1は数百光年の範囲を一枚に収めているので細かい構造はわからないが、位置分解能のいい電波望遠鏡でSS 433の近く数光年を撮ると、ジェットの噴射方向が周期162.5日、半頂角 $20^\circ$ で歳差しているのが見られる。これはまるで水を(光速の0.26倍で)出しているホースを(162.5日に1回転)振り回しているようだ。こんな変な天体は他に見つかっていない。(すこし似たやつは後で紹介する。)1978年の発見以来、観測的にも理論的にも熱心に研究されてきたが、いまだにジェットの加速機構や歳差機構など、基本的な物理がわかってない。なにしろ光速の0.26倍という相対論的速度であるから、ジェット・エンジン中心にいて関与しているのはブラック・ホールや中性子星といった相対論的天体であろうと穏当かつ保守的に推定されるが、

その正体も不明である。SS 433 はまさしく謎の天体であり、その解明は現代天文学の優先課題といえる。

というようなことは、実は発見以来もう20年にわたって言われつづけている。例えば1986年のある論文では「The strange close binary system designated SS 433 = V1343 Aquilae has preoccupied observers and theorists for over six years (この6年、観測屋も理論屋もSS 433 = 鷲座 V1343 というこの奇妙な近接連星系に没頭してきた)」<sup>1)</sup>とあるが、しばらく後の論文には「SS 433 has puzzled astrophysicists for more than decade (SS 433 は10年以上天体物理学者を悩ませてきた)」<sup>2)</sup>とあり、わりと最近も「Fifteen years after its discovery, SS 433 still is one of the most enigmatic objects known (発見から15年たった今もSS 433 は最も不可解な天体である)」なんて書かれている。年数ばかり増えて、謎解きはあまり進展してないのが読みとれる。

ここで紹介するのはX線天文衛星飛鳥<sup>あすか</sup>を用いた3年間にわたる観測結果である。研究は現在進行形だが、すでに過去の「常識」をくつがえす成果がいくつも挙がっており、新たなSS 433像が描かれつつある。ここにおいてついに長年の謎を解く転機が訪れ

ようとしている。ということになれば嬉しいのだが、判断はみなさんにお任せする。

## 2. X線天文衛星飛鳥の観測 —輝線がなんと20本—

SS 433の中心部分は図2のように推定されている。ジェットの本根や降着円盤の内縁、あるいは中心星そのものからは、高温・高エネルギーのためX線が放射されているだろう。するとX線で観測すれば、そうしたSS 433の核心を探ることができ、ジェット・エンジンの正体に迫れるはずである。このような期待からさまざまなX線ミッションがSS 433をターゲットとしてきた。しかしこれまでの観測装置はエネルギー分解能や有効面積が足りず、得られたスペクトラムは今からすれば不満足な品質のものであった。図3は(過去の)衛星EXOSATの撮ったSS433のスペクトラムである。こちら向きのジェットから放射された鉄輝線が7.81キロ電子ボルト(keV)に現れている。一方、あちら向きのジェットからの鉄輝線は見当たらない(とワトソンら<sup>4)</sup>は主張した)。この現象は、「あちら向きジェット」のX線放射領域(X線ジェット)が降着円盤に隠れているためと解釈され、したがってX線ジェットの長さは千万キロメートル程度かそれ以下と推定された。この結論は広く受け入れられ、教科書にも載っている<sup>5)</sup>。

ところが1993年4月23日、打ち上げられたばかりのX線天文衛星飛鳥が決定的なデータを送ってきた。図4は検出器SISによるSS 433のスペクトラムである。鉄輝線が2本、見まがえようもなくはっきり生えている。御丁寧

にアルゴンなどもことごとくペアになっている。フィットで分離できるものを数えると20本以上にもなり、これはおそらくX線天文学(慣例にしたがって太陽は除く)の記録ではあるまいか。これまで信じられてきた、あちら向きジェットが降着円盤に隠れているという教義は、この証拠により否定され、X線ジェットは千万キロメートルよりも長いことが確定した。また、EXOSATドグマに

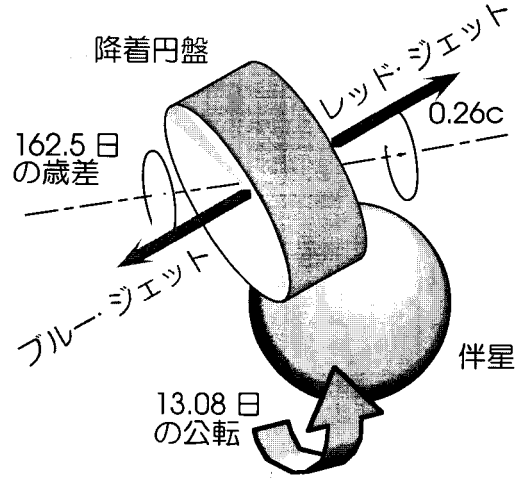


図2. ジェット・エンジンの概念図。伴星(普通の恒星)と中心星(ブラック・ホールか中性子星)は連星系をなす。中心星はごく小さいので図では省略した。伴星から中心星に落ち込む物質が降着円盤を作っている。落ち込む物質の一部がジェットとして吐きもどされる。

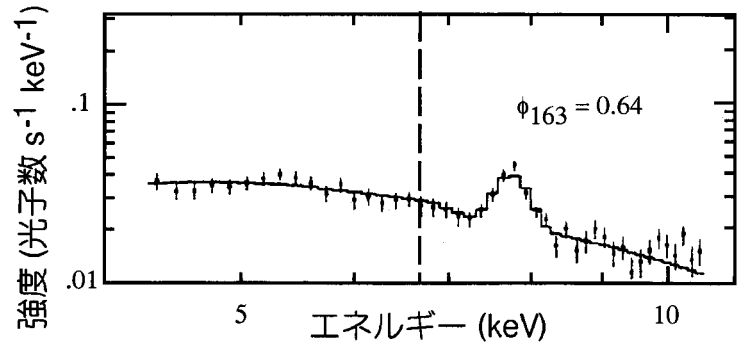


図3. EXOSAT衛星によるSS 433のスペクトラム<sup>5)</sup>。本来6.7 keVの鉄イオンの輝線が7.81 keVに紫方偏移している。

基づいた計算や推定は改定を迫られることになった。すぐれたエネルギー分解能、広い有効面積を追求したあすかの戦略の勝利といえよう。

ところで図3をよく見ると5.5 keVあたりがなんだか盛り上がっている。これはあちら向きジェットからの赤方偏移した輝線ではないだろうか。実はEXOSATのデータにも両方のジェットからの輝線が見えていたのである。答を知ってればこういう意地悪な指摘は簡単だが、自分のデータにこういう見落としが(たぶんあるが)ないようにしたいものだ。

さらに余談だが、検出器は当時おそろおそろ始動したばかりで、解析ソフトなども整備されていなかった。というか、解析方法自体がまだ確立していなかった。自作のソフトで試行錯誤しながらホット・ピクセルを取り、スプリット閾値を調節したところ、スペクトラム上に2本の鉄輝線が現れたのにはちょっとばかり感慨を覚えた。そのころ飛鳥は毎日のようにこうした衝撃的なデータを送ってきたものである。

こうして飛鳥がSS 433の観測にあつらえむきだとわかり、歳差の各位相をとらえるために三年計画が実施された。あすかは太陽に垂直な方向しか向けられないので、半年に一度しかSS 433の観測機会はめぐってこない。一方、歳差周期は162.5日と半年に近いので、飛鳥がSS 433を見ても前回と少しの差しかなく、全位相をおさえるのに3年かかったのである。途中、地上観測所などとの共同観測も行なった。アイオワ大自動望遠鏡、アジアゴ天文台、MDM天文台、大宇陀観測所、大阪教育大、岡山天体物理観測所、鹿児島宇宙空間観測所、木曾観測所、キット・ピーク国立天文台、クリミア天文台、クリメンヘガ天文台、天山天文台、ドミニオン天体物理観測所、美星天文台、マルチプル・ミラー・テレスコープ天文台、ロイアノ天文台、ワース・ヒル天文台、ワイズ天文台、それにX線天文衛星RXTEがキャンペーンに参加した。観測は1996年4月に一段落し、観測回数30回(姿勢制御ミスを含む)、有効観測時間50万秒

に達した。しかしテレメトリ(衛星からの信号)になおすと約2ギガバイトちょっとで、ちかごろの感覚では大したことはない。つぎはこの中に隠れたSS 433の物理をひきだす作業である。

### 3. 鉄輝線診断

#### —いかに物理をひきだすか—

図4より瞭然だが、そびえたつ鉄輝線は他の貧弱な輝線を圧倒しており、ノイズに負けない確かな情報が、しかもこの天体の場合2倍、汲みだせる。解析は象徴崇拝的に鉄輝線が中心となる。(あるいはむしろそうした象徴主義から二項対立的解釈へのパラダイム・シフトか。)まず中心エネルギーの赤方/紫方偏移からジェットの視線速度がわかる。条件のよい時は可視光データに匹敵する精度で求めることができたので、これを可視光同時観測と比べたところ、X線ドップラー・シフトと可視光ドップラー・シフトに有意な差はみつからなかった。これはX線を放射する時点で加速はほぼ完了していることを意味する。したがって加速機構として提唱されているモデルのうち、放射加速のように加速完了までに長い距離を要するものはおそらくだめなのである。ジェット物質は百万キロメートルより小さな領域で、十秒間くらいの瞬時に光速の0.26倍まで加速されているのである。

目では図4に鉄輝線は3本しか判別できないが、フィットすると4本あるのがわかる。Fe xxv(=Fe<sup>+24</sup>)とFe xxvi(=Fe<sup>+25</sup>)がそれぞれ2本ずつである。条件のいい時にはさらにドップラー・シフトしてない中性(もしくは軽く電離した)鉄輝線も現れる。おそらくこれはジェット起源ではなく、降着円盤など周辺物質がX線で照らされて蛍光を発しているのだろう。この強度比Fe xxvi/Fe xxvからはジェットの温度がわかる。プラズマが高温だと電離が進み、Fe xxviが増えるからである。数値計算と比較し、ジェットの根本は2.5億度と求められた<sup>7)</sup>。噴射された物質はこの温度から下がりながら飛び

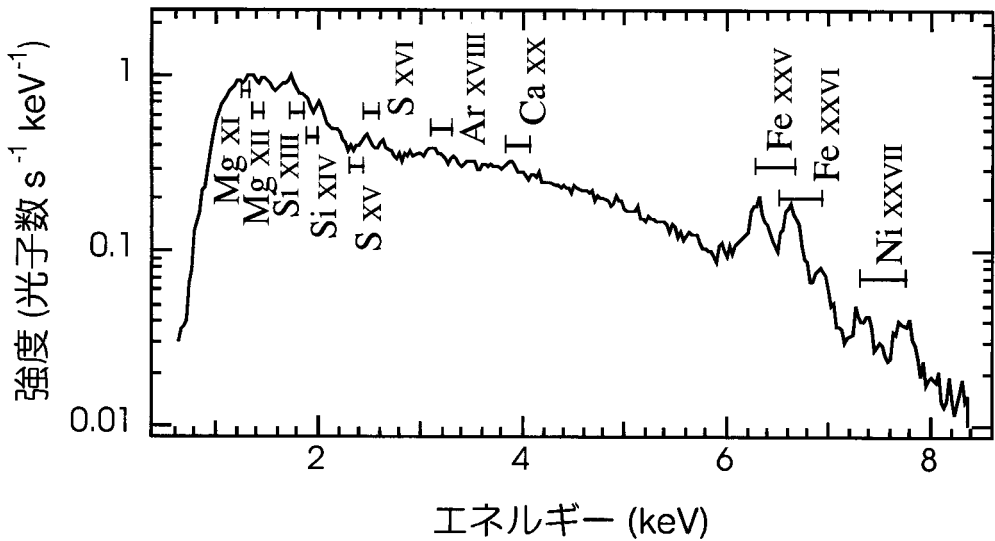


図4. あすかによるSS 433のスペクトラム. 2本のX線ジェットから発したマグネシウム, 珪素, 硫黄, アルゴン, カルシウム, 鉄のイオンの輝線がドップラー・シフトによって分裂している.

進むことになる. ややこしいことに, この根本の温度は歳差にともない変わることがわかった. また, こちら向きジェットは常にあちら向きジェットより熱くみえる. これは, 降着円盤がジェットの根本をちよっぴり覆っていて, 降着円盤が歳差すると覆う割合が変わると解釈するとつじつまがあう. 降着円盤の半径はX線ジェットの長さの0.2倍程度とするとうまく観測とあった. ジェットの歳差機構を説明する試みに, スレイヴド・ディスク説というのがある. これによればジェットの歳差は降着円盤の歳差によってひきおこされ, 降着円盤は物質を供給している伴星の自転軸の歳差にしたがう. この観測結果は歳差機構としてスレイヴド・ディスク説を強く支持する. 歳差の原因を伴星におしつけているだけの気もするが, SS 433の歳差機構がみえてきたといえよう. 他波長での観測結果もスレイヴド・ディスク説と矛盾はない.

SS 433はまた蝕連星系でもあり, 13.08日に一度伴星がジェットの一部分を隠す. 飛鳥はそれぞれのジェットからの輝線を別々に測れるので, 蝕の間,

どのジェットがどれくらい隠されていくかを刻一刻と追跡できる. 図5は1996年4月の蝕で得られた光度曲線である. この蝕の幅は伴星の大きさを, 深さはX線ジェットの長さを反映している. 球形の伴星が棒状のジェットを隠す簡単なモデルでフィットしたところ, 図5の実線のようになった. 御覧のとおり大変よくあっているとはいいがたいが, 連星距離を1として伴星半径は0.48~0.62, X線ジェット長は0.70~0.98となった. 伴星がロシュ・ローブを満たしていると仮定すれば半径から中心星と伴星の質量比が求められて0.06~0.31となる. これと可視光観測による軌道速度<sup>8)</sup>を組み合わせると中心星の質量がわかるはずなのだが, 結果は太陽質量の0.6~4.2倍と今のところあまり精度がよくない. これでは中性子星(太陽の1.4倍)なのかブラック・ホールなのかわからない. もう少々向上させるべくモデルなどを検討中である. 質量の不定性にはX線だけでなく可視光データにも責任があつて, 軌道速度の値が人によってまちまちである. ここではファブリカ<sup>8)</sup>の値を用いたが, ドドリコ

ら<sup>9)</sup>の値を使うと太陽の0.15～1.11倍にしかならず、これでは白色矮星である。どれが信頼できるのか、だれか教えてほしいものだ。

以上のような問題があつて質量を求めるのは難しいが、系のサイズはもっと正確に求められる。もっとも知りたいX線ジェット長は2.6～3.9億キロメートルとなった。これは過去の推定値の十倍である。もし我々の太陽の位置にこのジェット・エンジンがあれば、地球までようやく高温プラズマが届くことになる。このX線ジェット長さえわかれば他の物理量が次々求められる。たとえばX線ジェット長とプラズマの密度には関係がある。プラズマが濃いとX線放射効率がよいので、発射後、遠くへ飛び去る間もなくX線をどんどん出して温度が下がってしまう。長いX線ジェットは低い

プラズマ密度を意味しているのである。密度から今度は単位体積あたりの放射エネルギーがわかり、これとX線光度を比較して、ジェットの射出質量が十萬ギガトン/秒、運動エネルギーが十億ヨタジュール/秒 (=  $10^{33}$  ジュール/秒) と求められた。輝線が分離できるとこのように物理がひきだせるのである。

#### 4. 宇宙ジェット

##### —銀河系最強のジェット・エンジン—

この十億ヨタジュール/秒を超える運動エネルギーは莫大なもので、太陽の放射エネルギーの数百万倍、通常のX線連星系の出せるエネルギーの百倍、活動銀河核の暗いやつに匹敵する。しかも通常の系ではエネルギーはX線の形で放出されるが、

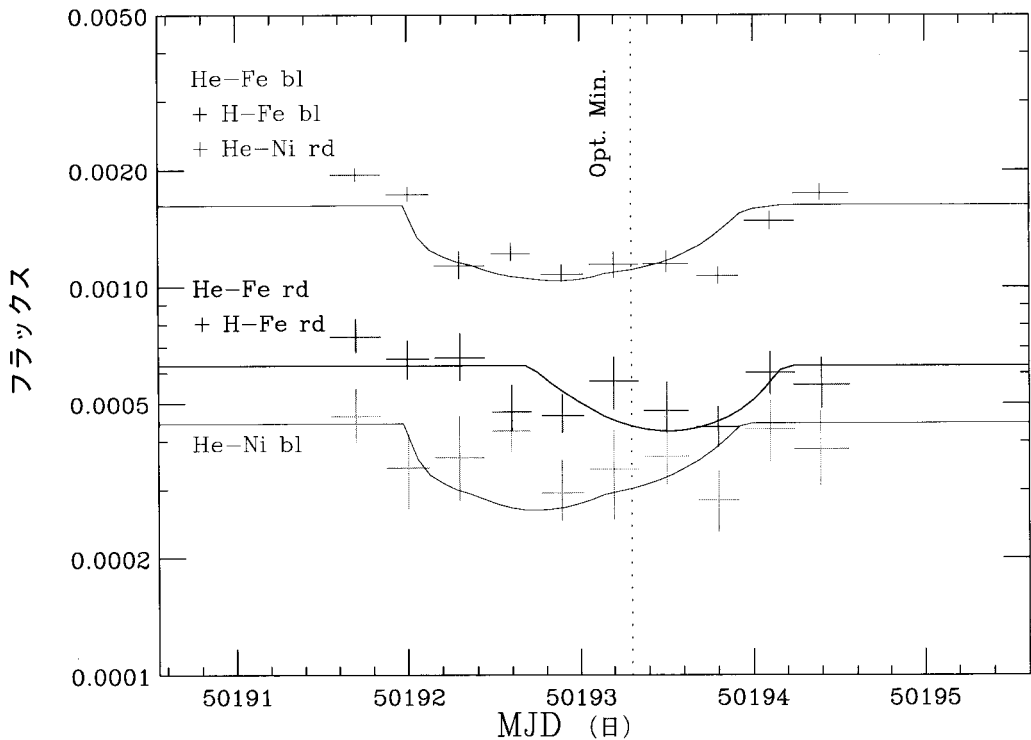


図5. 蝕中の輝線光度曲線。こちら向きジェットからの鉄輝線 (He-Fe bl + H-Fe bl + He-Ni rd), あちら向きジェットからの鉄輝線 (He-Fe rd + H-Fe rd), こちら向きジェットからのニッケル輝線 (He-Ni bl) の強度の時間変化。実線はモデルによる計算値。こちら向きジェットの蝕ははっきり見えているが、あちら向きはよくわからない。

SS 433 では X 線の明るさは大したことがなく、ほとんどすべてがジェット運動エネルギーに変換されている。なんとすごい効率のジェット・エンジンである。また十萬ギガトン/秒という射出質量もすごい。月をまるごと1個、2日で噴射し尽くす勘定になる。ジェットとなって光速の0.26倍で飛び出してくる物質だけでそれだけあるのだから、供給される燃料はその数倍なくてはならない。それだけ物質を事象の地平線なり中性子星表面なりに落とすためには、伴星から宇宙空間にばらまかれる物質はさらにその数倍あるはずである。少なめに見積もって百万ギガトン/秒としても、太陽1個を1万年で使い尽くしてしまうことになる。

実は我々の銀河系内のジェット天体は SS 433 だけではない。GRO J1655-40, GRS 1915+105 などのトランジェント・ジェットと呼ばれる天体が見つっている。トランジェント・ジェット天体は数十日おきに電波や X 線で明るくなり、その時プラズマを光速の0.9倍という、SS 433 よりさらに大きな速度で発射する。トランジェント・ジェットと SS 433 の性能を表1に比べてみた。SS 433 はジェットが(速いがそれでもトランジェント・ジェットと比較すれば)遅いのだが、常にジェットを噴射しているので通年の運動エネルギーでは一桁勝る。もしトランジェント・ジェット天体のジェット物質が電子・陽電子プラズマなら、差はさらに圧倒的になる。銀河系内最強のジェット・エンジンはやはり SS 433 だろう。他のジェット天体と比べてさえ特

殊な SS 433 だが、歳差の原因が伴星にあることや、大量の質量放出などを考えると、この特殊性は伴星や軌道などの環境に起因するのではなからうか。一方、トランジェント・ジェットの中心にあるのが回転ブラック・ホールだという説があり、これが事実だとすれば、トランジェント・ジェットの生成には中心天体の性質が効いているのかもしれない。

我々の銀河系内にはジェット天体は珍しいのだが、外に目を向ければジェット銀河は多数見つっている。もちろんそうした銀河ジェットは系内ジェットにくらべてスケールもエネルギーも桁違いに上だが、超光速運動、細く絞られたジェット流、歳差運動など類似点も多い。これら X 線連星系から活動銀河核まで何桁・何階層にもわたるジェット現象には、はたして共通のメカニズムが働いているのだろうか。だとすればゲテモノに属する系内ジェット天体の研究は、実は普遍的で基本的な現象である宇宙ジェットの一端をおさえる意義がある。飛鳥によるこの研究が宇宙ジェットの統一的な理解への一歩になれば嬉しい。統一できないという理解への一歩でもまあよいが。

この研究はまだ終わったわけではないが、ここまでこられたのは、そもそもこの天体の存在を教えてくれた河合誠之氏、理研の基礎特研に就職してからもぐずぐずと博士論文を書いているのを見逃してくれた松岡 勝氏の両氏の指導のおかげである。またこの仕事の多くの部分は宇宙研での院生の時にな

表1. ジェット性能表

カテゴリ	速度	射出質量		運動エネルギー		ジェット・エンジン
		瞬間最大	年間平均	瞬間最大	年間平均	
SS 433	0.26 c	10 <sup>17</sup> kg/s	10 <sup>33</sup> J/year	10 <sup>40</sup> J/year	中性子星? ブラック・ホール?	
トランジェント・ジェット	0.92 c	10 <sup>17</sup> kg/s	10 <sup>34</sup> J/s	10 <sup>39</sup> J/year	回転ブラック・ホール?	

★ 射出質量、運動エネルギーなどの示量性変数はジェット2本の合計。トランジェント・ジェットのプラズマは電子・陽電子プラズマかもしれないが、ここではバリオンを仮定した。SS 433 の年間平均運動エネルギーは活動銀河核の暗いものに匹敵。

されたが、指導教官の長瀬文昭氏にはお世話いただいた。名前を挙げはじめるとページが足りない多くの方々は、本来怠け者の筆者を教唆煽動して二日酔いにしてくれた。この場を借りて御礼申しあげる。

### 参考文献

- 1) Kemp J.C., Henson G.D., Kraus D.J., Carroll L.C., Beardsley I.S., Takagishi K., Jugaku J., Matsuoka M., Leibowitz E.M., Mazeh T., Mendelson H., 1986, ApJ 305, 805
- 2) Chakrabarti S.K., Matsuda T., 1992, ApJ 390, 639
- 3) Arv N., Begelman M.C., 1993, ApJ 413, 700
- 4) Watson M.G., Stewart G.C., Brinkmann W., King A.R., 1986, MNRAS 222, 261
- 5) Charles P.A., Seward F.D., 1995, Exploring the X-Ray Universe (Cambridge University Press, Cambridge) p.278
- 6) Kawai N., 1996, in Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources, ed. Giovannelli F., Sabau-Graziati L. (Italian Astronomical Society, Firenze) p.381
- 7) Kotani T., Kawai N., Matsuoka M., Brinkmann W., 1996, PASJ 48, 619
- 8) Fabrika S.N., Bychkova L.V., 1990, AA 240, L5
- 9) D'Odorico S., Oosterloo T., Zwitter T., Calvani M., 1991, Nature 353, 329
- 10) Zhang S.N., Cui W., Chen W., 1997, ApJL 482, L155
- 11) Kotani T., 1997, Doctoral Thesis, University of Tokyo
- 12) Kotani T., Kawai N., Aoki T., Doty J., Matsuoka M., Mitsuda K., Nagase F., Ricker G., White N., 1994, PASJ 46, L147

★ SS 433 についてはすぐれた解説や記事がすでに書かれている。興味を惹かれた方、X線以外の波長での観測について知りたい方のために日本語解説をいくつか挙げておく。

- (1) マーゴン B. (小田稔 訳), 1984, 別冊サイエンス 69 特集『高エネルギー天文学 X線してみた宇宙』, 40 — 短くまとまっているが, 絶版. マーゴン氏は水素輝線の偏移の発見者.
- (2) クラーク D.H. (福江純 訳), 1985, 『SS 433 伝説謎の天体を追う天文学者たちの群像』(恒星社) — 一冊まるごと SS 433 で占められている. クラーク氏はタッチの差で第一発見者になれなかった一人.
- (3) 福江純, 1993, 『「宇宙ジェット」銀河宇宙を貫くプラズマ流』(学習研究社) — SS 433 だけでなく, 銀河ジェットなどについても書かれている.

### X-RAY OBSERVATIONS OF A GALACTIC JET SYSTEM SS 433 WITH ASCA

Taro KOTANI

*Special Postdoctoral Researcher / RIKEN*

Abstract: The enigmatic galactic jet system SS 433 was observed with ASCA. Doppler-shifted emission-line systems from the both jets were discovered in the X-ray spectrum. Thus, the X-ray jet was proved to be longer than expected. Physical parameters of the jet such as temperature, density, and mass outflow rate were determined from the observation campaign over three years. It is suggested that SS 433 is far more energetic and stormy than previous estimations.