

X線でさぐる原始星

坪井陽子，小山勝二

〈京都大学理学研究科 〒606-01 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: tsuboi@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

星は約 10 K という極低温の暗黒星雲の中で、ガスや塵が収縮することによって生まれる。そんな低温の世界、高エネルギー現象とはとうてい無縁と思われていた場所に生まれた星の新生児、原始星が約 1 億度もの高温プラズマをもち強い X 線を放射していることがわかった。原始星の周りには、濃い塵やガスが存在し、ほとんどの電磁波はこれらに遮られてしまう。従って中心星そのものはベールにかくされたままであった。濃い星周物質をも透過する硬 X 線を使った原始星の研究は、今まさに始まったばかりである。

はじめに

天の川には、核融合反応によって自らの力で輝く無数の星が存在する。その明るい星の集団に混じって、ところどころ真っ暗な場所が見つかる。これが暗黒星雲と呼ばれ星の誕生する舞台である。暗黒星雲は、太陽の数倍から数万倍もの質量の極低温ガスや塵のかたまりである。星の誕生はこれらの物質の重力収縮により始まる。分子雲はいくつかの分子雲コアに分裂し、さらに何らかの過程で角運動量と磁場を放出しつつ、中心部へと動的ガス降着を続け、やがて一つの星が誕生する。星として最も若い時期に対応する原始星 (protostar) は、この中心コアへガスが動的降着している時期である。もとの分子雲コアの質量が小さい場合、動的降着を終えた後、準静的に収縮を続ける時期 (T Tauri 型星) を経由してやがて核融合で輝く星、主系列星になる。主系列星になる前の星を前主系列星とよぶ。中質量コアの場合は Herbig Ae/Be 星と呼ばれる時期を経由して中質量の主系列星となるが、大質量分子雲コアでは進化が早いので、上記のような進化の分類がない。

このように、分子雲コアに分裂したときの質量でその後の進化の道筋が一義的に決まり、最初の

質量が大きいほど星の進化がはやいので逆に星の初期は観測にかけりにくい。ここでは星の進化の研究がもっとも進んでいる小質量星に絞って話を進める。

1. 可視光、赤外、電波の観測

可視光は暗黒星雲中の大量な塵によって吸収されてしまう。従って前主系列星や分子雲コアの研究の進展は電波・赤外での分光観測が発達を遂げたここ 20 年くらいのことである。Lada^{1), 2)}、及び Andre, Ward-Thompson, Barsony³⁾ 達は、可視・赤外線全波長域をカバーするエネルギースペクトル (SED: Spectrum Energy Distribution) の研究を行なった。この SED に従って、暗黒星雲の内側にある星とその周辺の構造を議論するのがわかりやすい。

SED で Class 0 と分類される最も若い段階の原始星は、温度 10 ~ 30 K の単一黒体放射で表される。ピークは 100 ~ 300 μm のサブミリ波長域にあり、可視、近赤外、さらに中間赤外を使っても検出できない。この放射は、星周エンベロープからのものと考えられ、原始星本体からの放射は見ることができない。Class 0 天体のほとんどが双極分子流を伴っている。この分子流は大量の降着物質が収縮する際の角運動量放出プロセスだと考えれば、

すでにエンベロープ内に中心星ができつつあることを間接的に示している。

進化がすすみ Class I になるとその SED は遠赤外波長域 $100\mu\text{m}$ 弱あたりにピークをもち、いくつかの黒体放射の重ね合わせで表わされる。最も優勢な遠赤外波長域の放射は星周エンベロープからで、近・中間赤外から遠赤外波長域にわたる降着円盤からの放射、及び大きく減光を受けた中心星からの放射、近赤外波長域が加わる。中心星の質量はエンベロープのそれとほぼ同じくらいにまで質量降着が進んでいる。この段階は中心星がやっと見え出す時期と考えられるが、その光は激しく減光を受け、また強い星周物質からの放射と分離観測することは事実上不可能である。

以上にのべた Class 0 ~ I が原始星に相当し、次の T Tauri 型星 (TTS) の SED は Class II ~ III に分類できる。

Class II は近赤外波長域にピークを持つ中心星からの黒体放射の方が優勢である。星自体も分子雲の密度の低いところに分布するため、可視光でも見える。エンベロープは消え (従って双極分子流もない)、準静的に質量落下する降着円盤からの放射が近・中間赤外から遠赤外線へかけて穏やかな傾斜で続く。後にのべる CTTS とよばれる時期

である。

Class III では降着円盤も消失し、ほぼ単一の中心星からの黒体放射で近似される。この段階で惑星系が形成されるのであろう。この時期は WTTS と呼ばれる。

以上のように暗黒星雲の奥に潜む Class I 以前の段階にある天体も、電波、赤外の波長を用いることによって観測できるようになった。とはいえそこで見えた構造は原始星本体ではなくその周りの円盤やエンベロープであった。その意味では原始星誕生の現場は、いまだ闇に包まれているといってもいいだろう。

2. 軟 X 線による研究

恒星からの X 線放射の発見は Einstein 衛星 (1978 ~ 1981) の重大な成果にあげられる。なかでも大きな驚きは極低温ガス、即ち X 線のような高エネルギー現象とは無縁と思われていた暗黒星雲から非常に強い X 線源が見つかったことである。

Montmerle 達⁴⁾は、 ρ Oph 暗黒星雲を観測し、多くの T Tauri 型星から太陽 X 線 (フレア時) の 100 倍から 1 万倍もの強い X 線を見つけた。この領域の X 線イメージを図 1 (左図) に示す。別の時期に観測した同じ領域の X 線イメージを図 1

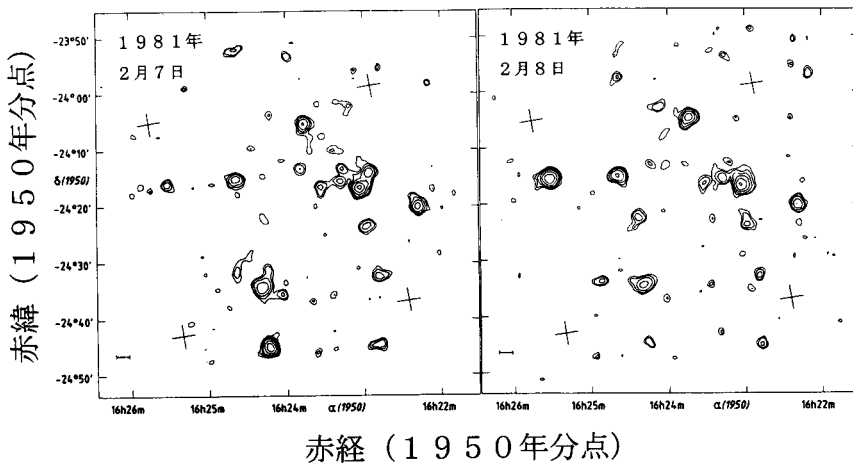


図 1 Einstein 衛星による ρ Oph 暗黒星雲の X 線イメージ (IPC 半値幅. 0.25-5.0 keV バンド)。左図, 右図共に同じ領域の観測だが別の時期でのデータを示してある。異なった強度分布は X 線源がそれぞれ激しく時間変動をしていることを示している。

(右図) に並べてみよう。異なった強度分布はこれらがそれぞれ激しく時間変動をしていることを示している。

典型的な時間変動の例として我々が ASCA で観測した T Tauri 型星 V773Tau の光度曲線を図 2 に示す。早い立ち上がりとは指数関数的に減衰する様子は太陽フレアに酷似している。この強度減少はプラズマ温度の低下 (放射冷却) によっている。簡単に評価してみるとプラズマの密度も太陽フレアのそれとほぼ同じで、最大の違いは T Tauri 型星フレアが 1 万倍も強いことである。

以上から T Tauri 型星の X 線放射機構は、太陽にみられる星表面の磁場活動の巨大版だと考えるのが妥当であろう。太陽と同じようなフレアループを考えると、その長さは星と同程度 ($\sim 10^8$ cm) である。星を大きくまたぐような巨大フレアが T Tauri 型星表面で頻繁に起こっているのである。

太陽フレアは、磁場が自転の微分回転と表面对流層によって増幅され、磁力線はひねられて星表

面へ浮き上がり、その磁力線の再結合するときにエネルギーが解放され起こると認識されている。つまり対流、自転がフレアを作る鍵なのである。理論では T Tauri 型星は大規模な対流層を持つ。可視光での観測では多くの T Tauri 型星は主系列星よりも速い自転速度をもつことが分かっている。従って T Tauri 型星での大規模な磁場活動、フレア現象は素直に理解できることであろう。

Einstein 衛星で観測された X 線源の多くは、実は T Tauri 型星とは認識されていなかった。これらの星の SED を調べてみると多くは先に述べた Class III 天体に相当する。いずれも従来から知られていた T Tauri 型星と異なり、 $H\alpha$ など可視光での輝線が弱い。従ってこれらは Weak lined T Tauri 型星 (WTTS) と呼ばれるようになった。X 線で見つかった新しい分類の前主系列星である。これに対し従来の T Tauri 型星は Classical T Tauri 型星 (CTTS) と呼ばれるようになった。 $H\alpha$ など可視光の輝線は降着円盤から放射されていると考えられるので、

これら輝線のある (強い)、なし (弱い) は降着円盤のある (Class II = CTTS)、なし (Class III = WTTS) と直接対応付けられる。WTTS は、既に星周物質が晴れ上がっているという意味で、Naked T Tauri 型星 (NTTS) とも呼ばれている。その数は CTTS の 2 ~ 10 倍も多く存在する。これはまた星の進化において WTTS の時期が CTTS の時期より長いことを示している。円盤を持つ CTTS も、持たない WTTS も、減光を除けば放射 X 線には大差は見られず、星周物

V773 Tau の光度変動 (0.7-10 keV バンド)

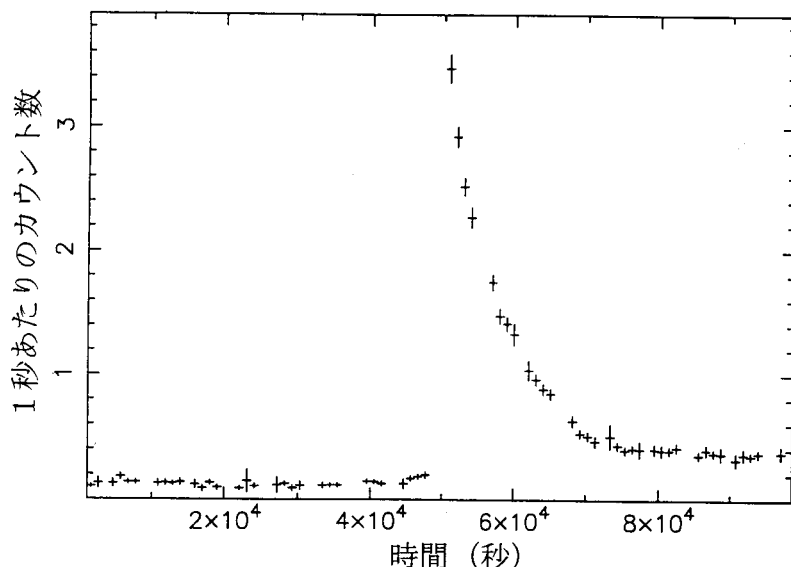


図 2 ASCA 衛星による T Tauri 型星 V773Tau の光度変動 (GIS による)。早い立ち上がりとは指数関数的に減衰する様子は太陽フレアに酷似している。

質はX線放射にそれほど影響しないことが分かった。これはまたX線が星周物質からではなく星の表面から放射されていることの証拠でもあろう。

ROSAT 衛星 (1990 ~) は Einstein に比べ感度、角分解能が向上し、多くの点源の分離検出を可能にした。さらに全天掃査観測とも相まって T Tauri 型星の X 線サンプルを大幅増加させ、統計的な研究を可能にした。それらは、T Tauri 型星における星表面での X 線の明るさ ($= L_x / 4 \pi R^2$) と自転周期の相関の発見⁵⁾、Chamaeleon I では WTTS が、CTTS より微小ではあるが系統的に強い X 線強度を示すこと⁵⁾、また L1495E⁶⁾ や Chamaeleon I⁵⁾ での $L_x/L_{\odot} \sim 10^{-3} \sim 10^{-4}$ という相関、あるいは分子雲から遠くはなれた場所での多くの WTTS の発見などである。いずれも X 線をとおした T Tauri 型星の統一的理解に有用なデータとなろう。

ρ Oph 暗黒星雲は多くの TTS の時間変動によって、全体で見ると、クリスマスツリーの周辺に飾ってあるライトのようにチカチカとついたり消えたりするように見える (X-Ray Christmas tree⁴⁾)。まさにクリスマスツリーそのもので、点灯しているライトは暗黒星雲の最も密度の濃い領域にはなく、暗黒星雲周辺の密度のさほど高くない領域であった。他の暗黒星雲でも程度の差こそあれこのような現象が観測される。軟 X 線にしか感度を持たな

い Einstein 衛星や ROSAT 衛星では暗黒星雲の深部、その中心とそこでおこっているであろう星の誕生のドラマまでは迫ることができなかったのである。

3. 硬 X 線観測

外国の X 線衛星が暗黒星雲の X 線研究をしていたころ、日本の X 線衛星は手をこまねいていたわけではない。撮像能力は持たないながらも硬 X 線観測でその特徴を出そうとしていた。てんま (1983 ~ 1984) ぎんが (1987 ~ 1991) 衛星は暗黒星雲には温度 2000 万度から 5000 万度もの超高温物質からの X 線放射が付随することを見つけた。さらにぎんが衛星での ρ Oph 暗黒星雲中心部の観測⁷⁾ では強い吸収を受けた約 4000 万度の X 線フレアの検出に成功した。これは軟 X 線フレアとはほぼ同じ時間変動を示した。その減衰のタイムスケールから、この放射が星程度のコンパクトな領域から放射されていることは明らかとなった。暗黒星雲深くに埋もれた原始星からの X 線を示唆する発見であった。

4. あすかの観測

あすか (1993 ~) は、初めての硬 X 線望遠鏡衛星である。ぎんが衛星で見つかった、暗黒星雲中

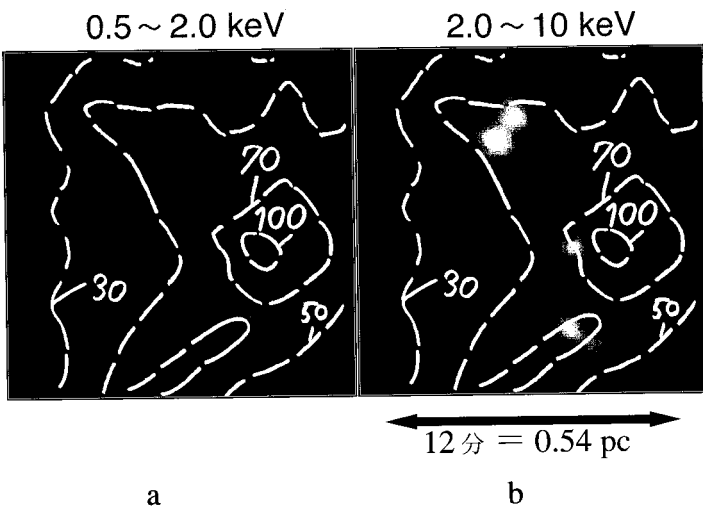


図3 ASCA 衛星による ρ Oph 暗黒星雲の X 線写真、a は 2 keV 以下の軟 X 線バンド、b は 2 keV より上の硬 X 線バンドを示す。共に C¹⁸O の contour map を重ねてある (数値は A_V 値)。軟 X 線バンドでは Einstein や ROSAT での観測と同じく、暗黒星雲の中心部 (分子密度の最も高い領域) には X 線は全く検出されていないが、硬 X 線バンドでは中心部に 5 個の硬 X 線源が検出された。このうち二つの硬 X 線源 (ソース 2, 4) は、SED で Class I と分類される原始星候補と一致した。(ソース 2 が WL6, ソース 4 が EL29)

心部の吸収を受けた硬X線フレアの正体を探るべくこの望遠鏡が暗黒星雲へ向けられた。図3 aは、2 keV以下の軟X線で見えた ρ Oph暗黒星雲のX線写真である。C¹⁸Oのcontour mapを重ねてある。EinsteinやROSATでの観測と同じく、暗黒星雲の中心部(分子密度の最も高い領域)には、X線は全く検出されていない。ところが、図3 bで示す2 keVより上の硬X線で見ると、暗黒星雲中心部に5個の硬X線源が出現した。このうち二つの硬X線源は、SEDでClass Iと分類される、原始星候補と一致した⁸⁾。

EL29という原始星からは観測中にT Tauri型星と同様な時間変動を示すフレアが観測された。フレア時の温度は約7000万度という超高温を示し、予想どおり軟X線は強く吸収を受けていた。吸収の激しさから、この放射がエンベロープより内側からの放射であることが分かる。フレアの減衰のタイムスケール(約3時間)から見積もったX線放射領域は、太陽のそれと比べると桁違いに大きい。

とはいえその大きさは星程度でありこの放射は星近くのコンパクトな領域から放射されていると考えてよい。電波～軟X線波長にかけての全てのバンドで見えなかった原始星が、硬X線バンドにおいて初めて姿を現したのである。

別の原始星WL6も強度変動を示したが、その温度は約3000万度で一定、しかも正弦波的な変動であった。フレアとは異なるようである。我々はとりあえず、この時間変動はX線放射領域が自転によって見えかくれしているものだと考えている。その自転周期は約1日である。これは典型的なCTTSの自転(約一週間)及びWTTSのそれ(約3日)に比べて有意に短い。降着物質の角運動量が星に持ち込まれたことによって高速回転しているのだろうか。

これが原始星の自転の初検出に相当するのかどうか、我々にはまだ自信はないが、いずれにせよ硬X線が自転周期検出の現状では唯一の手段であることは間違いない。前にのべた様に自転周期は

磁気活動性を決める鍵であるだけでなく、星に持ち込まれた角運動量そのものである。ガス収縮の速度、形態は角運動量をどれだけ持ち込み、いかに捨てるかによって大きく規定される。前者を直接みるのが自転速度なら、後者にからむ重要な現象が双極分子流であろうか。関本らと我々はこの観点にたつて硬X線が見つかった原始星から双極分子流の検出に挑戦した。結果、すべてから双極分子流が見つかった。原始星の有力な証拠を加えたわけである。

別の暗黒星雲をみてみよう。図4 a(表紙)は2 keV以下の軟X線バンドで見えたR CrA暗黒星雲のX線写真である。H₂COのcontour mapも重ねてある。数個のX線源(TTS, Herbig Ae/Be星)があるのが分かる。しかし、やはり暗黒星雲の中心部(最も分子密度の濃い部分)は、真っ暗である。これを4 keV以上のバンドで見ると、図4 b(表紙)のように2 keV以下で見られた軟X線源は姿を消し、代わりに暗黒星雲のど真ん中にくっきりとX線が現われた。赤外線源も図に示しているが、硬X線源はClass I天体、即ち原始星と良い対応を示していた。

図4 bを拡大し、2 cmと6 cm電波(VLA)によるcontour mapを重ねると、図4 c((表紙)右上)になり、やはり硬X線源や赤外線源と対応した天体が見られる。この電波(VLA)で2つ目玉の天体(ジェット天体か?) R1からは温度約1億度にもなるフレアを検出した⁹⁾。

原始星固有の現象か否かはっきりしないが、注目すべき発見はフレア中のX線スペクトルから6.2 keVと6.9 keVに二本の輝線が見つかったことである。この2輝線をドップラーによる分離とすると光速の10%にもなり、たかだか100 km/sの双極分子流とは比較にもならない。強い鉄輝線を持つ硬X線放射と2つ目玉の電波構造はSS433のような中性子星を連想させる。しかし低質量星生成領域たる暗黒星雲にSS433のような中性子星(あるいはブラックホール)が存在するとは考えにくい。

星の形成されるある段階において、このような超高エネルギー現象が一時期だけ存在するのだろうか？

5. 結論と今後の課題

原始星からの X 線は数例しか見つかっていない。これはまだ観測例が少ないことにもよるが、一方では観測しても X 線が検出できなかった原始星もある。したがって原始星からの X 線ということで一般的な結論をだすことは危険である。それを承知の上で一応の結論をのべ、今後の課題を検討する。

- (1) 原始星は硬 X 線源であり、ときにフレアを起こす (EL29)。

X 線輝度は太陽のそれと比べ 4 桁ほど高く TTS と同程度。フレア時のプラズマ温度は太陽及び TTS に比べ有意に高い。

- (2) 原始星からの自転周期が検出できた(?) (WL6)。
温度変化を伴わない、正弦波的な X 線強度変動を検出。自転による X 線放射領域の面積変動と解釈できる。周期は約 1 日であり高速に回転している。

- (3) 未知の現象を検出

電波ジェット天体(?) R1 から、約 1 億度のフレアを検出した。フレア時のスペクトル中には、2 つに分離した鉄輝線が見つかり、それをドップラーシフトと考えると、光速の 1/10 程度になる。

これらの結果から今後次のような課題をあげられるだろう。

- (1) 硬 X 線を用いた原始星の探査。

X 線の放射が始まる時期、原始星コアの形成される時期をさぐる。

- (2) 原始星の収縮過程を探る。

ダイナモ機構は対流、角運動量による磁場増幅機構である。一方、星の収縮は、角運動量、磁場によって抑えられる。原始星にどの程度の角運動量、磁場が持ち込まれるか、フレアを検出することにより評価する。双極分子流は角運動量放出機構だと一般に考えられているが、そ

れらとの関係を明らかにする。

- (3) 原始星の自転周期をはかる。
(4) ダイナモ以外の X 線放射機構の可能性。

RCrA にみられた輝線構造、ジェット天体との関係

暗黒星雲はあすかの硬 X 線撮像能力が最大限生かされる X 線天文の New Frontier である。「星の誕生」という課題に X 線がどのような解答を与えるだろうか？

参考文献

- 1) Lada, C. j., 1987, in IAU Symp.115, Starforming Regions, eds. Peimbert and Jugaku (Reidel) p.1
- 2) Wilking, B. A., 1989, PASP 101, 229
- 3) Andre, P., Ward-Thompson, D., Barsony, M., 1993, ApJ 406, 122
- 4) Montmerle, T., Koch-Miramond, L., Falgarone, E., Grindlay, J., E., 1983, ApJ 269, 182
- 5) Feigelson, E. D., Casanova, S., Montmerle, T., Guibert, J., 1993, ApJ 416, 623
- 6) Strom, K. M., Strom, S. E., 1994, ApJ 424, 237
- 7) Koyama, K., Asaoka, I., Kuriyama, T., Tawara, Y., 1992, PASJ 44, L255
- 8) Koyama, K., Maeda, Y., Ozaki, M., Ueno, S., Kamata, Y., Tawara, Y., Skinner, S., Yamauchi, S., 1994, PASJ 46, L125
- 9) Koyama, K., Hamaguchi, K., Ueno, S., Kobayashi, N., Feigelson, E. D., 1996, PASJ, 48, L87

X-ray probing for Protostars

Yohko Tsuboi

Katsuji Koyama

Department of Physics, Kyoto University,
Kitashirakawa-Oiwake-Cho, Sakyo, Kyoto 606-01

Abstract:

We detected hard X-rays from protostars, which had been unexpected by modern theories.

The plasma temperatures were extremely high, up to 10^8 K. Protostars are often embedded deeply in star forming clouds and shrouded by dense circumstellar gas and dust, hence are invisible in the optical and soft X-ray bands. ASCA observations, with the hard X-ray sensitivity, should have significant impacts on our understanding of star formation scenario, in particular at the earliest phase of stellar evolution.