

チャンドラで捉えた星の産声

坪井 陽子

〈ペンシルバニア州立大学理学部天文及び宇宙物理学科〉

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

tsuboi@astro.psu.edu

1999年7月、20年以上もの準備期間を経て、アメリカからX線天文衛星チャンドラが打ち上げられた。従来より2桁上がった角度分解能（FWHM約0.5秒角）、およびそれに伴って2桁下がった検出限界を用いて、いままでは検出できなかった極初期の原始星まで遡ることが初めて可能になった。原始星を纏う厚いベールが、今、剥がされようとしている。

1. 星の誕生プロセス

天の川に輝く無数の星々。その集団に混じって、ところどころ真っ暗な場所が肉眼で確認できる。光では漆黒のこの闇こそ、暗黒星雲と呼ばれ、まさに星が生まれようとする舞台である。この闇は電波領域で強い分子輝線を放射することから分子雲とも呼ばれ、その正体は太陽質量の数倍から数万倍にも及ぶ零下250度の極低温のガスである。分子雲は、微細に見ると列島状に連なった無数のコア（分子雲コア）に分裂している。これらの中心で星の種（中心星）ができ、その種の成長期（原始星）、成長停止後の種自身の収縮期（Tタウ型星）を経て主系列星に至る。

星の誕生プロセスは特に進化がゆっくりと進む小質量星について詳細に調べられており、各進化段階は可視から電波にわたる広い波長域のエネルギースペクトル（SED: Spectrum Energy Distribution）およびアウトフローによって以下のように分類されている。それらが観測的にどう見えるか、模式図を図1に示す。

中心部にまだ星をもたない分子雲コアは「星なしコア」と呼ばれ、温度約10Kの単一黒体放射のSEDを持つ。

中心部に星ができると原始星と呼ばれ、その初

期はClass 0と分類される。遠赤外からミリ波にかけて温度15～30Kの単一黒体放射が観測されるが、この放射は中心星を厚く包むエンベロープからの放射であり、中心星自身の光ではない。中心星が放っているはずの可視光および近赤外線はエンベロープにシャットアウトされて、検出不能なのである。よって原始星本体（中心星）の存否は、唯一、アウトフローの有無で間接的に知るのみである。この段階で見られる活発なアウトフローは、物が中心星へと落ち込む際に捨てられる角運動量放出現象だと考えられるので、Class 0は星周ガスの動的降着期、星誕生の動乱期であるといえる。SEDからも中心星の質量はまだエンベロープの質量より小さく成長過程にあることが示唆される¹⁾。

原始星後期にあたるClass IではSEDは最も優れた遠赤外波長域の星周エンベロープからの放射に、近赤外から遠赤外にわたる降着円盤からの放射、及び近赤外での中心星近傍からの放射が加わる。ただし主に散乱されて出てくる中心星からの光は激しく減光を受けており、星周物質からの強い近赤外線放射と分離観測することは事実上不可能である。この段階での中心星の質量はエンベロープのそれより大きいと見積もられ、質量降着はほぼ終わっている。実際、アウトフローによる質量放出率は、Class 0からClass Iに至るときに劇的に減少

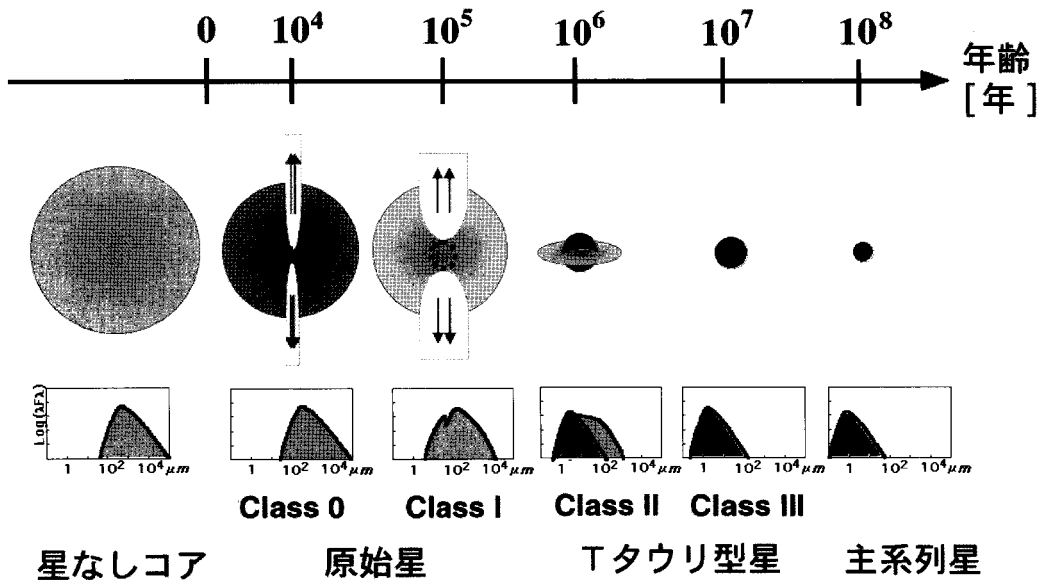


図1：可視から電波で捉えられる星の誕生。想像図ではなく実際に観測で見えている構造を示す。中段に示したエネルギースペクトル（SED: Spectrum Energy Distribution）およびアウトフローによって分類されている。原始星段階（Class 0, I）では中心星は全く見えていない。

しており²⁾、質量降着率も劇的に減少していると類推できる。

こうして原始星段階は終わり、元あった分子雲コア（エンベロープ）の一部が星へと降着し、一部がアウトフローとして放出され、またアウトフローによって散逸され、中心星本体が初めて表面に現れる。可視光による分類でTタウリ型星と呼ばれる期間の始まりである。その前期、Class IIのSEDは、近赤外波長域にピークを持つ中心星からの黒体放射と、原始惑星系円盤からの放射が近赤外から遠赤外線へかけて穏やかな傾斜で続く。可視光ではCTTS（Classical T Tauri型星）と分類される。

原始惑星系円盤も消失、または観測不能となるとSEDは星からの単一黒体放射で近似でき（Class III段階）、可視光ではWTTS（Weak line T Tauri型星）と分類される。ここで惑星系が形成されると考えられる。この後、星自身の収縮により中心部の温度が高くなり、核融合の火が灯ると、長く安定に光る主系列の時代が始まる。

以上のように可視光では大量な塵によって阻まれ、透視不可能な暗黒星雲中の星生成プロセスも電波・赤外での分光観測の発達と共にここ20年で飛躍的に理解が深まった。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、アウトフローであった。その意味では原始星が誕生する現場そのものは、いまだ闇に包まれているのである。

2. あすか時代

—原始星研究の幕開け—

八方塞がりであったこの闇に意外な風穴を開けたのは、電波でも赤外でもなくエネルギーの高い硬X線であった。小山他³⁾は今年3月に永眠したX線天文衛星あすか（1993～2001）を用いて「へびつかい座」暗黒星雲を観測し、理論上、全く予測されていなかったにもかかわらず、全波長を通じて検出できなかった原始星（Class I）本体を初めてX線で検出した。この発見を皮切りに、「南のかんむ

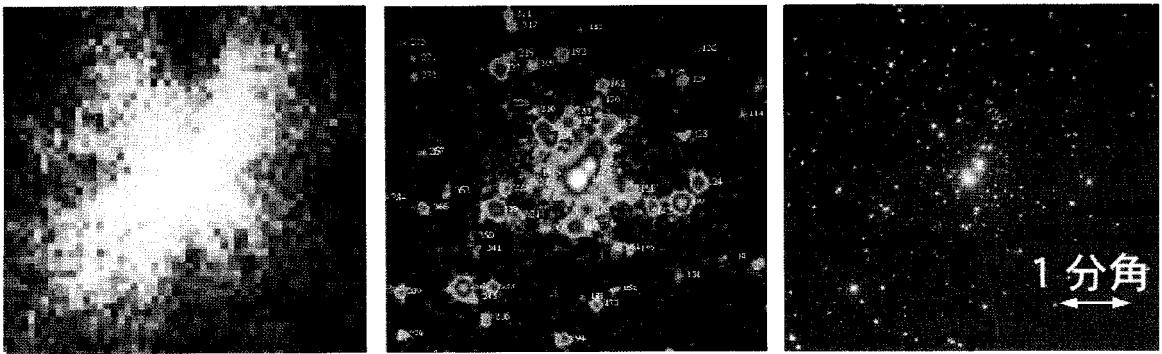


図2：あすか(右)¹³⁾、ローサット(中)¹⁴⁾、チャンドラ(左)¹⁵⁾で見たオリオントラペジウム領域。あすかやローサットで広がって見えていたX線は、ピントの良いチャンドラではきれいに点源として分離されている。これによって今までは見えなかった暗い天体、吸収を受けた天体、混みあった天体を検出することが可能になった。

り座」(R CrA 分子雲)⁴⁾、「一角獣座 OBI 分子雲領域」⁵⁾、「オリオン座」の分子雲(L1630)⁶⁾からも相次いで Class I 天体が検出された。なお、軟X線での観測ながら、ローサット衛星の長時間観測でも Class I 天体からのX線放射が発見されている⁷⁾。

いくつかの Class I 天体からはフレアが検出され⁴⁾⁸⁾、また、2つの周期的時間変動(強度変動および準周期的フレア)が発見された⁸⁾⁹⁾。温度変動を伴わないX線強度変動はX線活動領域の自転による見え隠れと解釈できるが、その周期は約1日と極めて速い。準周期的フレアは星とディスクとを結ぶ大規模磁場構造のつなぎ変えが、星の自転と円盤のケプラー回転との差動回転によって起こると考えられるが、この周期も約1日で、星の高速回転(約1日)が示唆されている¹⁰⁾。

1940年代に太陽X線、1980年代に恒星一般およびTタウリ型星(Class III, II 天体)からの強い軟X線が発見された。しかし軟X線(<4 keV)観測では可視光と同程度の減光を受けるため¹¹⁾、原始星の潜む暗黒星雲はやはり暗黒にしか見えなかった。これに対し、あすかは10 keVまで感度を持つ世界初の硬X線望遠鏡衛星であり、10 keVでの減光の断面積は1 keVのそれに比べて2桁も小さい。1990年代、ついにこのあすか帯域の透過力の

強さが、T Tauri 段階で留まっていたX線天文のフロンティアを原始星段階まで押し進めただけでなく、従来、どんな波長を用いても見ることのできなかった原始星本体に迫る硬X線の有効性を明示したのである。

しかし、その一方で撮像能力が充分でなく星生成領域中の星を完全分離できないこと、本格的な星の探査に必要な検出限界に到達していないという、あすかの限界も明らかになってきた。星は集団で誕生し、その後散らばって行く。また若い星ほど星周物質を厚く纏っている。よって、進化を遅れば遅るほど星からのX線は減光を受け、また星同士を空間的に分離することは難しいのである。結局あすかでは30-40%のClass I 原始星だけが検出され¹²⁾、動的降着の主段階であるClass 0 天体からはついにX線を検出できなかった。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瞬間までは迫ることができなかったのである。

3. チャンドラ参上

この大きな難問を一気に解決するX線天文衛星が1999年7月にアメリカから打ち上げられた。20年以上もの歳月を費やして製作されたチャンドラである。チャンドラは焦点距離10 mものX線望遠

鏡を持つ。この鏡はX線望遠鏡としては初めて、それも極限まで磨かれており、結果として従来のX線衛星あすかより2桁、ローサットよりも1桁良い角度分解能 (FWHM 0.5 秒角) を誇る。主検出器であるX線 CCD カメラ (ACIS) を用いれば、あすかと同程度の広いエネルギーバンド (0.2–10 keV) で観測でき、角度分解能とも合わせて約2桁、あすかやローサットより検出感度が良くなる。これによって今までは見えなかった暗い天体、吸収を受けた天体、混みあった天体を検出・分離することができ、原始星の進化の最も初期まで遡ることができる。解像度の比較例として図2にあすか¹³⁾、ローサット¹⁴⁾、チャンドラ¹⁵⁾で見たオリオントラペジウム領域 (若い星の集団) を載せる (表紙も参照)。

3.1 Class I からの X 線

我々は Class I 原始星がひしめく、へびつかい座暗黒星雲をチャンドラで観測した¹⁶⁾。視野の一部 (コア F 付近) の X 線カラー写真を表紙に示す。波長の長い軟 X 線を赤、短い硬 X 線を青で示している。たくさんの青い X 線源が見えているが、多く

は Class I 原始星であり、赤い成分は激しく吸収を受け、青い成分だけが検出されている。視野中には18個の Class I 原始星 (またはその候補) が存在したが、我々はそのうち実に70%を検出した。より進化した Class II や Class III と変わらぬこの検出率は、実質上全ての Class I 原始星が X 線源たりえることを意味する。

この領域のムービーを作ると、X線で赤い星 (T タウリ型星) も青い星 (Class I 原始星) も、クリスマスツリーのようにばらばらに点いては暗くなった。それぞれの光度曲線を X 線カラー写真の周辺部に示す。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。この強度の減衰はプラズマ温度の減衰 (放射冷却) に起因しており減衰のタイムスケール (数時間) もほぼ同じである。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、最大の違いは原始星フレアが最大級の太陽フレアよりも100倍から10万倍強いことである。以上から Class I 原始星の 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

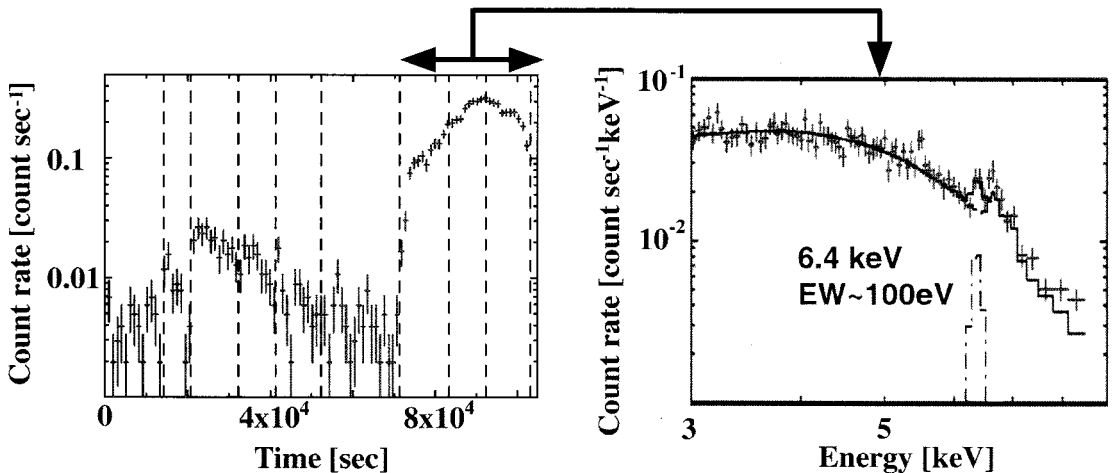


図3 : Class I 原始星 YLW16A の光度曲線 (左) と 2 番目のフレア時のスペクトル (右)¹⁶⁾。エネルギー 6.7 keV の高電離の鉄輝線の他に 6.4 keV の中性 (低温) 鉄輝線も伴っている。原始星本体から出た X 線が星近傍の円盤によって反射されたと考えられる。

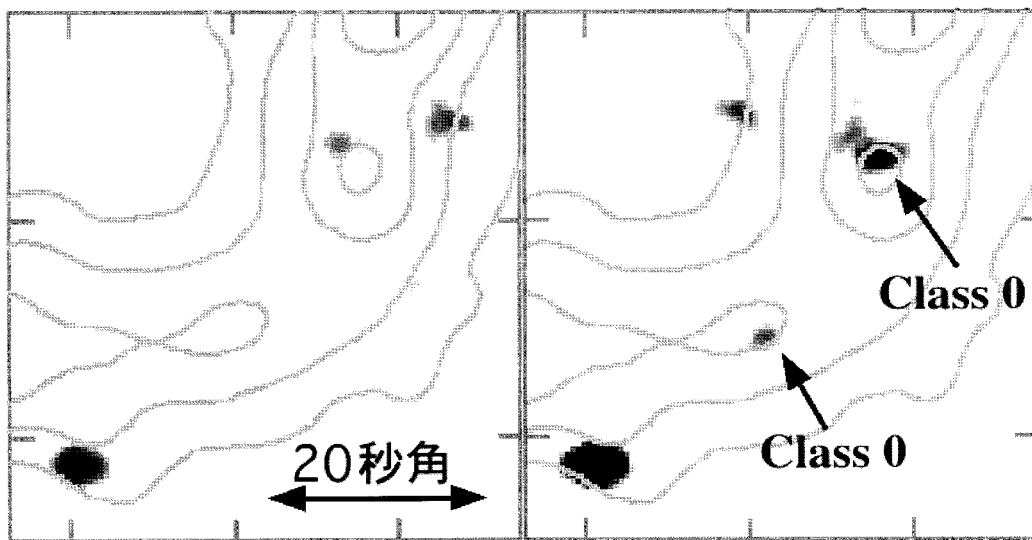


図4：チャンドラ衛星で撮像したオリオン座分子雲（OMC-3領域）²¹⁾。左はエネルギー3 keV以下の軟X線帯域，右は3 keV以上の硬X線帯域を表す。等高線は塵の濃さを表している¹⁶⁾。Class 0候補天体である2つの塵の塊から強く吸収を受けた硬X線を検出した。

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（ $\sim 10^{11}\text{cm}$ ）である。星を大きくまたぐような巨大フレアが原始星表面で頻繁に起こっているのである。

中でも Class I 原始星 YLW16A は大きなフレアを起こした。X線光度曲線を図3左に示す。明らかなフレアが2回起きているが，2つめはなぜか形がひしゃげている。この2番目のフレアのみを抽出してスペクトルを書かせると図3右になる。面白いことに，エネルギー6.7 keVの高電離の鉄輝線の他に6.4 keVの中性（低温）の鉄輝線が見えている。前者は星近傍の高温プラズマ自身から発せられているだろうが，後者は何であろうか。実はよく似たスペクトルはセイファート銀河に見られる。その類似性から，中心天体，ここでは原始星本体から出るX線が周りの低温物質に反射して中性鉄輝線を放出していると解釈できる。約100 eVと大きな中性鉄輝線の等価幅，あまり大き過ぎないX線の吸収（ $\text{NH} \sim 10^{22}\text{cm}^{-2}$ ）はまるでセイファートI型の銀河

とそっくりである。大量の鉄が視線方向からそれて存在し，X線を反射していると考えられる。フレアが始まってから遅くとも3時間以内には中性鉄輝線が出ているので，反射領域は20 AU以内から分布していると制限がつく。以上からX線は，10000 AU程度にまで球対称に広がるエンベロープではなく星の極近傍にフェースオンで広がる円盤に反射されていると結論できる。この考察を応用し，将来もっとX線の検出感度があがれば，フレア時のスペクトルをより小さな時間幅で取ることにより，フレアと円盤との構造・幾何（ループは星と円盤をつなぐか？星のみでできるか？円盤上でできるか？）にまで迫れるであろう。

3.2 Class 0 からのX線

先に紹介したオリオントラペジウムは赤い翼を広げた不死鳥のようなオリオン大星雲（M42）の中に位置する。その星雲の北には青く光る反射星雲（NGC1977）が広がる。最近，両星雲の間に列島

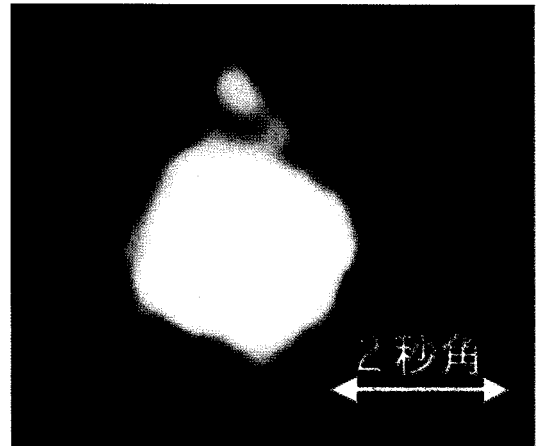
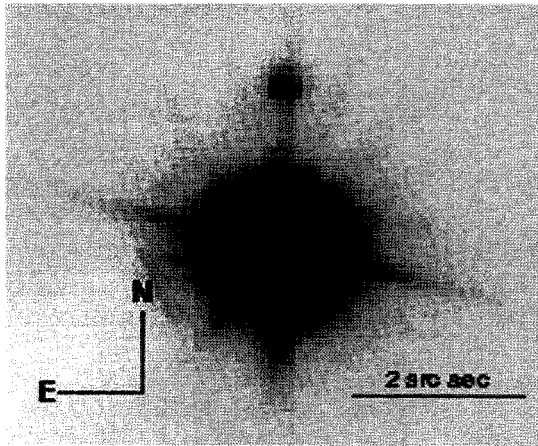


図5：Tタウリ型星TWA-5A（下の明るい星）とその伴星，褐色矮星TWA-5B（上の暗い星）。右はIバンドで撮像した赤外写真²²⁾，左がチャンドラで撮像したX線写真²³⁾。褐色矮星は木星の約20倍の質量を持ち，年齢は約1千万年と比較的若い。主星であるTタウリ型星とは約2秒角（約100 AU）離れた場所に存在する。褐色わい星は太陽X線と同じか少し明るいX線を放出していた。

状に連なる塵の塊が発見され，星形成の初期段階にある天体の集まりと言われるようになった¹⁷⁾。北に行けば行くほど塵の塊の温度は下がり，星自身が冷たい塵に隠れいされた段階，つまり進化段階が若くなることを意味している。

実は我々はあすかでこの塵の列島を観測していた。そして点源には分離できなかったが，微弱なX線が列島に沿って存在することを突き止めていた¹⁸⁾。ここに目をつけ，早速チャンドラを同じ方向に向けた。新ミレニアムの初頭（1月1日），異例の長期観測であった。この列島の最北部のX線写真を軟X線バンド（左：0.5–3 keV），硬X線バンド（右：3–6 keV）に分けて図4に示す。等高線は塵の濃さを表している¹⁷⁾。いくつか等高線のピークが見えているが，これら一つ一つが将来約1個の恒星を形成する塵の塊である。我々はそのうち2つのピークから硬X線を検出した。3 keV以下の軟X線ではそれらは見えない。X線の受けた吸収は明らかにClass I原始星（ $NH \sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ）より1桁大きかった（ $NH \sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ）。X線を放つ塵の塊は近赤外線では見えず¹⁹⁾，また水素分子輝

線で大規模なアウトフローを持っており²⁰⁾，原始星初期，Class 0段階としての特徴を兼ね備えている。へびつかい座で検出した原始星よりさらに約10倍若い天体と考えられる。こうして我々は冷たい塵の中で胎動する産まれたての星を初めて捉えたのだ²¹⁾。

「分子雲コアの中で低温度星として生まれ，収縮にともなって温度が上昇しやがて内部で核融合の火がともる」。星の誕生と成長はこのように静かなものではなかった。想像を絶するが，極寒の塵の中であって，まだ1人前の大きさに育つ途中で，星は1億度近い大規模超高温プラズマの生成，放出をしていた。このような激動の新生児-幼児期をたえしのぎ，やがては静かに輝く太陽（恒星）になるのである。

3.3 原始恒星から原始褐色矮星研究へ

では将来にわたって質量が小さく，恒星にならない天体はどのようなX線を放出しているだろうか？ 我々は木星質量のたった20倍の若い褐色矮星をチャンドラで観測した。図5左にIバンドで

の写真を載せる²²⁾。明るい星はTタウリ型星で、約100 AU北(上)に伴星である暗い褐色矮星が捉えられている。年齢は約1千万年と考えられている。我々はこの星からなんと $2 \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1}$ という太陽X線と同じか少し明るいX線を検出した。X線写真を図5右に載せる。HRダイアグラムで林フェーズ上に乗っている若い天体はその質量にかかわらず(将来核融合反応を起こす起こさないにかかわらず)強いX線を出しているようである。

4. 星誕生研究の新世紀

X線による原始星研究はあすかの時代に幕が開け、そのフロンティアは、高空間分解能を誇るチャンドラによって、誕生直後にまで大きく発展した。動的降着期にある中心星の成長、そしてその運動(角運動量)を追うための一筋の光明が見つかったのである。

将来星になる天体だけではなく、星にはなり得ない質量の小さい褐色矮星、ひいては惑星までもが誕生時には激動の時代を経験していたのかもしれない。激動の進化を遂げる星々のドラマが今まさに捉えられようとしている。

参考資料

- 1) André P., Montmerle T., 1994, ApJ 420, 837
- 2) Bontemos S., André P., Tereby S., Cabrit S., 1996 A&A 311, 858
- 3) Koyama K., Maeda Y., Ozaki M., Ueno S., Kamata Y., Tawara Y., Skinner S., Yamauchi S., 1994, PASJ 46, L125
- 4) Koyama K., Hamaguchi K., Ueno S., Kobayashi N., Feigelson E. D., 1996, PASJ 48, L87
- 5) Nakano M., Yamauchi S., Sugitani K., Ogura K., 2000, PASJ 52, 437
- 6) Ozawa H., Nagase F., Ueda Y., Dotani T., Ishida M., 1999 ApJL 523, L81
- 7) Grosso N., Montmerle T., Feigelson E. D., André P., Casanova S., Gregorio-Hetem J., 1997, Nature 387, 56
- 8) Kamata Y., Koyama K., Tsuboi Y., Yamauchi S., 1997, PASJ 49, 461

- 9) Tsuboi Y., Imanishi K., Koyama K., Grosso N., Montmerle T., 2000, ApJ 532, 1089
- 10) Montmerle T., Grosso N., Tsuboi Y., Koyama K., 2000, ApJ 532, 1097
- 11) Ryter C. E., 1996, Ap&SS 236, 285
- 12) Tsuboi Y., 1999 PhD thesis
- 13) Yamauchi S., Yamauchi S., Koyama K., Sakano M., Okada K., 1996, PASJ 48, 719
- 14) Gagné M., Caillault J-P., 1994, ApJ 437, 361
- 15) Garmire G., Feigelson E. D., Broos P., Hillenbrand L. A., Pravdo S. H., Townsley L., Tsuboi Y., AJ 120, 1426
- 16) Imanishi K., Koyama K., Tsuboi Y., 2001, ApJ in press
- 17) Chini R., Reipurth B., Ward-Thompson D., Bally J., Nyman L.-A., Sievers A., Billawala Y. 1997, ApJL 474, L135
- 18) Tsuboi Y., Koyama K., 1999, Proceedings of Star Formation 1999, Editor: T. Nakamoto, p.187
- 19) Tsujimoto M., Tsuboi Y., Koyama K., Goto M., Terada H., Kobayashi N., 2001, Proceedings of New Century of X-ray Astronomy, Editors: H. Kunieda and H. Inoue, in press
- 20) Yu K. C., Bally J., Devine D., 1997 ApJL 485, L45
- 21) Tsuboi Y., Koyama K., Hamaguchi K., Tatematsu K., Sekimoto Y., Bally J., Reipurth B., 2001, ApJ 554, 734
- 22) Neuhäuser R., Walter F. M., Covino E., Alcalá J. M., Wolk S. J., Frink S., Guilloit P., Sterzik M. F., Comerón F., 2000 A&AS 146, 323
- 23) Tsuboi et al. 2001 Proceedings of Stellar Coronae in the Chandra and XMM-Newton Era, Editors: Fabio Favata and Jeremy Drake, in press

X-ray probing for Protostars

Yohko Tsuboi

Department of Astronomy and Astrophysics, The Pennsylvania State University, 525 Davey Laboratory, University Park, PA 16802-6305, USA

Abstract: After long preparation of 20 years, Chandra X-ray Observatory was launched in July 1999. With two orders of magnitudes higher spatial resolution (FWHM 0.5") and two orders of magnitudes lower detection limit than those of the previous satellites, we now have a new tool to examine closest look yet at the youngest stars in the Universe, never before detected because they are hidden within dust and molecular clouds that filter all other types of light. Protostars with thick veils are now being unveiled.