

大質量星の形成領域における広がった X 線放射の 検証

江 副 祐一郎

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 高エネルギー天文学研究系 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉
e-mail: ezoe@astro.isas.jaxa.jp

大質量星は UV 光や星風を通じ、銀河に多大な影響を及ぼす存在である。透過力の強い X 線は、巨大分子雲に埋もれて観測が困難なこうした大質量星の形成領域の強力なプローブとなる。チャンドラ衛星の登場によって、1970 年代から示唆されていた星風と周囲の物質の衝突による衝撃波で加熱されたガスからの、「広がった X 線放射」が初めて詳しく検証できるようになった。

筆者らは、代表的な領域である NGC 6334 および NGC 2024 のデータを解析し、広がった X 線放射が確かに存在することを示した。また放射が熱的および非熱的放射の混合である可能性を指摘した。

1. はじめに

1.1 若い大質量星からの X 線放射の謎：星？ 広がったプラズマ？

太陽質量の 10 倍を超える大質量の星は、銀河系中の星間物質の ~50% の質量を占める巨大分子雲の高密度コアが収縮して生まれる。生まれた大質量星は毎秒 10^{37} - 10^{39} エルグもの強い紫外線や毎秒 1,000 km もの高速の星風を通じて周囲に大きな影響を及ぼす。そして最後には、超新星爆発によって大量の重元素や高エネルギー宇宙線を放出する。つまり、大質量星は銀河系の星間物質のリサイクルの担い手として、銀河の熱力学や化学的な進化を考える上で欠かせない。しかし、巨大分子雲に埋もれて強い吸収があること、また太陽程度の低質量の星の形成場所に比べて遠くにあることなどから、観測が難しく、大質量星の形成とその環境についてはよくわかっていない。

1974 年、ノーベル賞受賞者 Giacconi 博士らがウフル衛星を使ってオリオン星雲から X 線を検出して以来¹⁾、透過力の強い X 線は吸収の大きな

分子雲の内部を探る貴重なプローブとなった。初めての X 線望遠鏡を積んだアインシュタイン衛星は、オリオン星雲の X 線イメージを撮り、四つ星（トラベジウム）を含む多数の星を同定した²⁾。このとき、Ku 博士らは、イメージ上で点源として同定できない放射が約 35% も残ることに気づいた。似たような放射は、他の活発な大質量星の形成領域でも見られた。これは何か。解釈として、大質量星からの高速の星風が周囲の物質と衝突して生じる、衝撃波によるガス加熱が考えられた。たしかに、毎秒 1,000 km の速度をもつ星風によって生じたそのような衝撃波の下流では、最大で 1 千万度のガスの加熱が起きて X 線が出る³⁾。しかし、当時の角分解能と点源に対する感度では、これが暗い点源の集まりである可能性を否定することはできなかった。

1990 年代に入り日本の「あすか」衛星によって新たな知見がもたらされた。京大、山形大や東大などの研究者が中心となって、「あすか」は世界で初めてオリオンなどの硬 X 線（すなわちエネルギーの高い X 線）のイメージを取得した。そし

て、エネルギーの低い X 線は吸収されてしまうほどガス密度の濃い星形成コアから硬 X 線を検出した⁴⁾⁻⁶⁾など。そのエネルギースペクトルは光学的に薄いプラズマモデルでよく表され、強い吸収(水素柱密度にして $0.3-3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$)を見せた。温度は 1 千万度から 1 億度ほどと、主系列の大質量星の X 線放射の温度(おおよそ 1 千万度かそれ以下)に比べ、明らかに高い。やはり若い大質量星とその付近の領域には、非常に活発な高エネルギー現象が存在するらしい。一体、冷たい分子雲の中で何が起きているのだろうか? また、X 線は星の形成や進化にどのようにかかわっているのだろうか? だが「あすか」の角分解能では硬 X 線源を分解しきれず、星が一つかそれともたくさんか? さらに広がった X 線放射は存在するか? といったことはわからず、謎が残った。

1.2 チャンドラ衛星による進展: 広がった放射の正体は?

1999 年に打ち上げられたチャンドラ衛星は、大質量星の形成領域の目の覚めるような X 線イメージを撮ることに成功した。角分解能は 0.5 秒角と、「あすか」の 2 桁上であり、初めて可視光や赤外線と同じくらい鮮やかなイメージを取得できるようになった。

好例が、われわれから約 1,500 光年の距離にあるオリオン星雲のトラベジウムを観測である。たった約 17×17 分角の領域から、1,600 個かそれ以上の点源が発見され、多くは若い低質量の星に、一部は若い大質量星に同定された⁷⁾。ではアインシュタイン衛星で指摘された広がった X 線はどうなったのだろうか? 残念ながら視野中の非常に明るい点源の影響で検証が難しい。光学系の特性上、明るい X 線源があるとその周囲に像がハロー状に広がってしまうのだ。

では、他の領域はどうだろうか?

2001 年、Townsend 博士らはチャンドラで観測した、わりと近傍(距離 4,600 光年)にあるロゼッタ星雲から広がった X 線を検出した、とアメリ

カ天文学会で発表した⁸⁾。エネルギースペクトルは低温の 2 温度の熱的プラズマ放射で表され(70 万度と 9 百万度)、吸収は弱い ($0.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$)。博士らは、その後さらに M17 (距離 5,200 光年)からも同じような放射を見つけ、論文にまとめた⁹⁾。そして数百から千を超える X 線の点源の光度関数から、検出しきれなかった暗い点源の数を見積もり、少なくとも M17 は真に広がった放射である結論づけた。M17 の放射は大質量星の一群を根元として、分子雲の密度の低いほうへ数光年にわたって噴き出しているように見える。これはまさに大質量星の星風の衝撃波によって温められたガスであると彼女らは考えた。

ほぼ時を同じくして Wolk 博士らは、やはりチャンドラで RCW38 (距離 5,500 光年)という別の場所で広がった「硬」X 線を検出したと報告した¹⁰⁾。エネルギースペクトルの形状は、なんと、M17 とは全く異なり、プラズマからの放射によく見られる輝線などは見られず、むしろのっぺりとした連続成分(べき関数の光子指数 1.6)が特徴的である。この発見は大きな反響を呼んだ。なぜなら、これまで星形成領域の星からの X 線のエネルギースペクトルは、ある特定の温度で特徴づけられる「熱的」プラズマからの放射の形で説明でき、こんな変てこな形のは基本的になかったからである。

こうした形状の X 線スペクトルをもつ天体としては例えば、銀河の中心にある超巨大ブラックホールや一部の超新星残骸などがあり、それらはキロ電子ボルトかそれ以上の超高エネルギーに加速された粒子からの「非熱的」放射だと考えられている。ひょっとして若い大質量星の近傍でもこうした高エネルギーの加速現象があるのだろうか?

Wolk 博士らは、近赤外線の星の分布と比較して、X 線は暗い点源の重ね合わせではないとした。そして、この放射は昔の超新星爆発による超高エネルギー電子(エネルギーにしてテラ電子ボ

ルト、すなわちキロ電子ボルトの 10 億倍) のシンクロトロン X 線ではないかと主張した。しかし、Townesley 博士らはこの広がった放射のスペクトルが RCW38 内の場所によっては、点源の集合のスペクトルとそっくりなので、暗い点源の寄与が無視できないのではないかと主張している⁹⁾。残念ながら、いまのところ、はっきりとした結論は出ていないようである。

さらに似たような広がった放射は、より遠くの(2-3 万光年ほど)、銀河系でも一二を競う非常に大規模な星団(アーチ星団、五重星団や NGC 3603)でも報告されている¹¹⁾⁻¹³⁾。しかしこれらはわれわれからずっと遠くにあるため、チャンドラ衛星をもってしても厳密にイメージから点源を区別して除くことは難しい。

このように大質量星の形成領域における広がった X 線放射は、新たな高エネルギー現象として注目を集めつつあるものの、その起源や、放射が「熱的」か「非熱的」か、さらには暗い点源の集まりではない「真に」広がった放射は本当に一般的に存在するのか、などについて統一的な見解は得られていない。そこで本稿では、筆者らの研究を紹介し、この古くも新しい問題について最新の状況と解釈を述べたい。

2. 「あすか」の知識を活かして

広がった X 線放射をきちんと検証するためには、われわれに近い領域をチャンドラで観測するのが望ましい。広がった放射が星形成の活動にかかわるとすれば、なるべく活発な領域のほうが検出がたやすいと考えられる。そこで筆者らは NGC 6334 を選んだ。これは近傍の(距離 5,500 光年)代表的な星形成領域であり、少なくとも 8 個以上の若い大質量星が存在することが赤外線や電波の観測から知られている。しかも星形成のよい指標となる分子雲の全質量当たりの遠赤外線的全光度がわが銀河系で最も高いものの一つである。さらに JAXA 宇宙研の松崎恵一氏、国立天文

台の関本裕太郎氏らの「あすか」のデータ解析から、大質量星の形成領域の中で最も X 線光度が大きいものの一つであり、最も高温の放射を見ることがわかっていた^{5), 6)}。これをチャンドラで見ない手はない。「あすか」の成果もあって、筆者はチャンドラに 40 キロ秒×2 視野の観測提案を通すことができた。

さらに広がった放射が一般的かどうかを検証するため、筆者は、最も近い領域の一つ NGC 2024 に着目した。これはオリオン B 分子雲中に存在する HII 領域であり、距離が約 1,400 光年ととても近く、しかも山形大の山内茂雄氏らの「あすか」の観測から硬 X 線が検出されている¹⁴⁾。さらにチャンドラの 80 キロ秒の観測の公開データがあり、点源に関しては論文がすでに書かれていたものの¹⁵⁾、広がった放射の検証はなされていなかった。筆者はこの二つの領域のチャンドラによるデータを用い、広がった放射を検証することにした。

3. 広がった X 線放射は存在するか？

3.1 NGC 6334—The Bear Claw Nebula

表紙図(左)に示すように、NGC 6334 は北東から南西にかけて、遠赤外線で I-V、電波で A-F と名づけられた大質量星の形成コアをもつ巨大分子雲であり、それぞれのコアには一つ以上の若い大質量星がいると考えられている。この分子雲の質量は太陽の 16 万倍、全光度は太陽の 190 万倍に達する¹⁷⁾。コア中の生まれたての大質量星から出た紫外光が周りの濃いガスやダストで吸収され赤外線で明るく輝いていると考えられる。

表紙図(中、右)にチャンドラで得た X 線イメージを示す。多くの点源とともに、期待どおり、コアとよく空間的に相関した見かけ上広がった放射が検出できた。しかし、点源をきちんと除かなくてはこれが真に広がった放射かどうかまだわからない。

読者はチャンドラのような角分解能のよい衛星

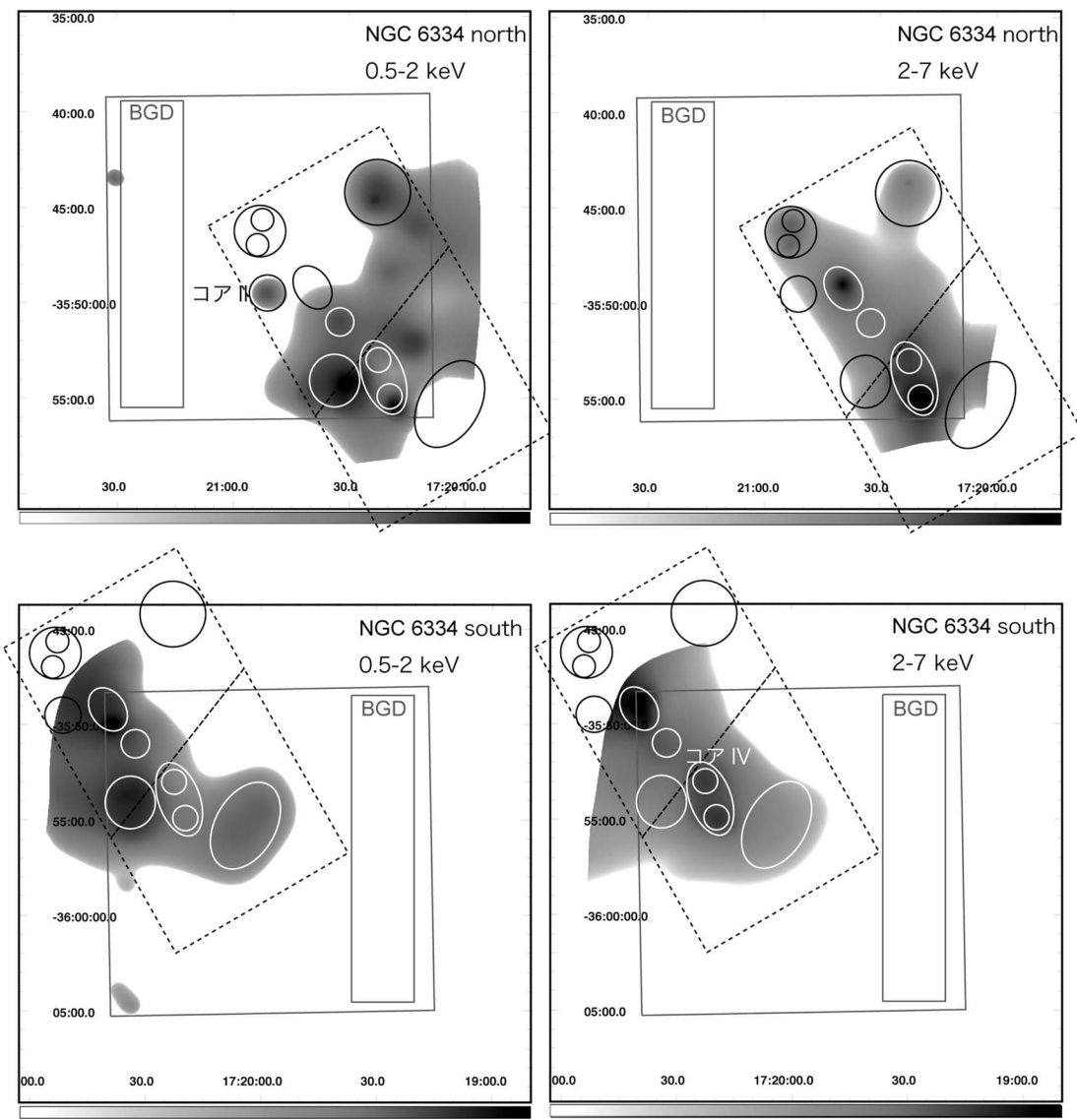


図2 NGC 6334 の点源を除去したイメージ。上下および左右はそれぞれ北と南の観測およびエネルギーバンドの違いに対応する。大きな四角は視野の大きさを示す。スムージングのため見かけ上、視野の外に放射が漏れ出している。小さな四角（点線および BGD）は広がった放射のスペクトルを抜きだした場所およびバックグラウンドをとった場所である。おなじように丸および楕円は場所ごとのスペクトル解析のためのもの。

なら、この作業はたやすいと思われるかもしれない。しかしチャンドラなどで用いる X 線の反射鏡は、極度な斜め入射の光学系なので、視野の端では収差が非常に大きい。また、短波長の X 線を反射させるのだから、鏡のマイクロな粗さによる散乱は避けられず、チャンドラといえども、点源の

周辺に輝度の低いハローが生じる。これを正確にくり抜かなくては広がった放射と見まちがってしまう。§1.2 で述べたようにオリオントラペジウム領域ではまさにこのハローが障害となったのである。

そこでまず、筆者らは点源検出ソフトウェアを

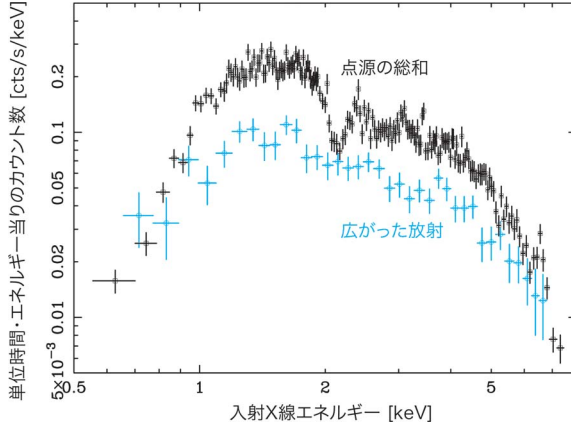


図3 NGC 6334 の広がった放射とその領域の点源の総和の X 線スペクトルの比較.

用い点源を探し、792 個を検出した。点源の光子数は 2 個から最大で 3,000 個ほどであり、最も暗いものは X 線光度にして毎秒 $\sim 2 \times 10^{29}$ エルグ (0.5–8 キロ電子ボルト) に対応する。これは若い低質量星 (すなわち T タウ星) の X 線光度に相当する。幸いトラペジウム領域のようにとてつもなく明るい点源はなかった。

次にきちんと点源の光子を除去するため、チャンネル専用の光線追跡ソフトを用い、点源一つひとつについて、 $Al K_{\alpha}$ 線のエネルギー (1.497 キロ電子ボルト) で 98% の光子を除去するマスクバ

ターンをつくった。そしてそれを X 線イメージに掛けて点源を除き、残った放射すなわち広がった放射イメージを作成した。それが図 2 である。なるべく解像度よく見るため、2 視野の観測それぞれについて作成した。見ていただければわかるとおり、点源を除去してもなお広がった放射は残ったのである。

放射がどんな性質をもつかを探るため、筆者らは図 2 に示すような約 15×30 光年の領域 (点線) を定義し、そのスペクトルを調べた。図 3 に広がった放射のエネルギースペクトル (青) とその

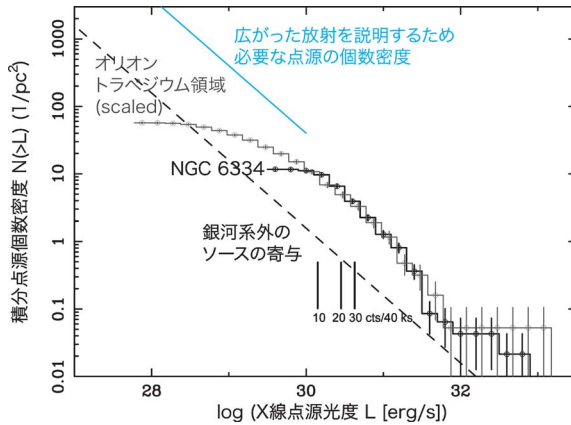


図4 NGC 6334 の広がった放射の領域の点源の光度関数。エラーは点源の数の 1σ ポアソンエラー。オリオントラペジウム領域の関数を、吸収および距離の違いを考え横軸方向に移動し、さらに NGC 6334 の完全検出限界 (約 30 カウント/40 キロ秒) で交わるよう縦軸方向に移動して示した。

領域の点源の和（黒）を比較して示す。一見して、(1) 広がった放射は統計的に有意であること（バックグラウンドを引いた後で $7,900 \pm 220$ カウント）、(2) 点源の総和の 1/2 程度の明るさをもつこと（0.5–8 キロ電子ボルトの X 線光度にして毎秒 2×10^{33} エルグ）、(3) 点源の総和に比べハードであること（高エネルギー側のカウント数の落ちが小さい）、がわかる。明らかに、この放射量は無視できないほど大きい。

ではこの広がった放射のうちどれだけが暗い点源なのだろうか？ これを見積もるには、光度関数を用いる方法と、X 線以外の波長の星のイメージと広がった放射とを比較する二つの方法がある。光度関数を使う場合、関数をどう外挿して暗いほうに伸ばすかに不定性があり、イメージの場合、そのイメージがどれだけ星を検出しきれているか、また個々の星がどれだけ X 線を出すかの不定性がある。私たちは、大質量星の形成領域の光度関数が類似していること¹⁸⁾などを考慮し、関数を使うことを選んだ。

図 4 に光度関数を示す。横軸は点源の見かけの X 線の光度であり、縦軸は積分した個数密度である。すべての点源について NGC 6334 の距離を仮定して光度を計算した。明るい点源ほど数が少なく、暗くなるにつれ数を増し、そしてほぼ一定に飽和する。これは実際に暗い点源が少ないのではなく、観測の時間内で十分に検出しきれないためと考えられる。

検出しきれていない点源を見積もるため、オリオントラペジウム領域の関数¹⁹⁾を、吸収や距離の違いを考えて重ね合わせると、図 4 のようになる。二つの関数はよく一致している。これを使って検出しきれていない暗い点源を見積もると、その数は 2,500 個になった。しかし一つひとつが暗いため、その光度はぜんぶ足しても広がった放射の 12% にしかならない。銀河系の外のソースの寄与も、やはり 3% ほどにしかならない。よって、暗い点源では広がった放射は説明つかない。つま

り、放射のほとんどは真に広がった放射と考えられる。

3.2 熱的？ 非熱的？

真に広がった放射は NGC 6334 にたしかに存在するらしい。では放射は「熱的」なのだろうか「非熱的」なのだろうか。§ 1.2 でも述べたように、もし非熱的であればこれは大きなインパクトをもつ。なぜなら、星形成領域からの X 線放射のエネルギースペクトルは基本的に（議論中である RCW 38 を除いて）熱的と考えられてきたからである。

図 3 からわかるように、広がった放射のエネルギースペクトルは点源よりもっぺりとして、プラズマからの輝線らしき構造は見当たらない。つまり非熱的と思われる。しかし疑いの目で見れば、分子雲の中ではさまざまなガスやダストが分布することで、吸収量が場所により異なりうる。結果として、もともと熱的な放射であっても吸収の違う場所からの放射が重ね合わさって、一見のっぺりとして見えてしまうことも十分ありうる。そこで、特徴的な場所ごとに分けてスペクトルを見ることにした。

図 2 を見ると、広がった放射は軟 X 線（左二つ）および硬 X 線（右二つ）でいくつか特に明るい領域をもつ。筆者らはこうした領域を 10 個ほど選び出し、スペクトルを調べた。例として、軟 X 線で選んだ遠赤外線コア II 付近の領域とコア IV 付近の領域（図 2 参照）のスペクトルを図 5 に示す。

一見して、コア II のほうが低エネルギー側のカウントが多く、一方でエネルギーが高くなるとカウントが少ないことがわかる。このことはつまり、コア II のほうが吸収が弱く、温度も低いことを示唆する。実際に、データと理論的なプラズマモデルとを比較して、吸収値と温度を推定すると、案の定、コア II は弱く吸収された（水素柱密度にして $0.4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ）、1 千万度の熱的プラズマからの放射でよくデータを再現できたのに対

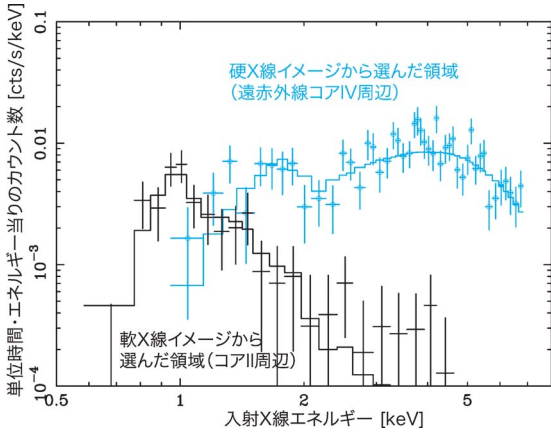


図5 NGC 6334 の広がった放射の場所ごとのスペクトルの例。実線はデータを最もよく再現したモデル（軟X線イメージから選んだ領域は熱的プラズマモデル、硬X線から選んだ領域はべき関数モデル）である。

し、コア IV はずっと強く吸収を受けた ($4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$)、超高温 (>1.4 億度) の放射で表された。同様に、他の軟 X 線の強い場所はほとぼの温度の熱的な放射 (1-4 千万度) で表されたのに対し、硬 X 線の領域のほうはずっと高温 (5 千万-1 億度もしくはそれ以上) の放射と強い吸収を示す。

この硬 X 線の強い領域の温度は通常の星のプラズマにしてはあまりにも高い。非熱的なのではないか？ 筆者らはそう考え、なかでも特に高温

のコア IV およびその周辺の領域のスペクトルをべき関数モデルで再現しようと試みた。するとなんと非常に小さな光子指数 (0.4-1) をもつモデルで表され、しかもプラズマモデルよりもよりデータをよく再現することがわかった。

念には念をと、筆者らは一温度のプラズマが二つの異なる吸収を受け、このようなのっぺりとした放射をつくることができるかを検証した。しかし、結果は変わらず、この場合もなお超高温のプラズマ (1.3 億度) を必要とする。やはり非熱的と考えるほうが良いようだ。つまり、NGC 6334 の広がった放射は、熱的プラス非熱的な放射の重ね合わせの可能性が高く結果として図3のようなのっぺりとしたスペクトルとなっているのだらう。

3.3 NGC 2024—The Flame Nebula

NGC 6334 の結果に励まされ、筆者らは NGC 2024 の解析に進んだ。NGC 2024 はオリオン B 分子雲 (質量にして太陽の 8 万倍) の中の HII 領域であり (図 6 左)、若い大質量星 IRS 2b (O8V-B2V) が電離源と考えられている²⁰⁾。図 6 (中、右) に X 線イメージを示す。視野の中心にやはり見かけ上広がった放射を発見した。そのサイズは 2 光年ほどと NGC 6334 の広がった放射全体と比べると小さく (図 1 中右)、場所ごとに分けた領域とほぼ同じくらい (図 2 小さな丸および楕円)

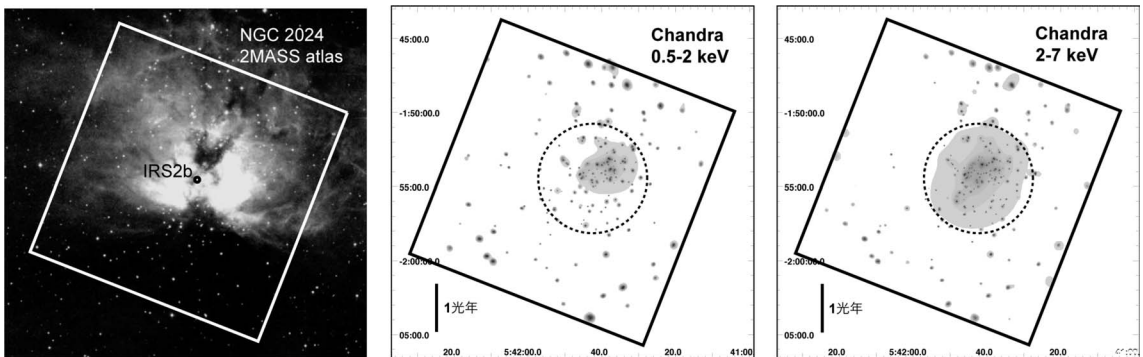


図6 図1と同様、ただし NGC 2024 のもの。左図の小さい丸は大質量星 IRS2b の位置²⁰⁾を、中および右図の丸 (点線) はスペクトル解析に用いた広がった放射の領域を示す。

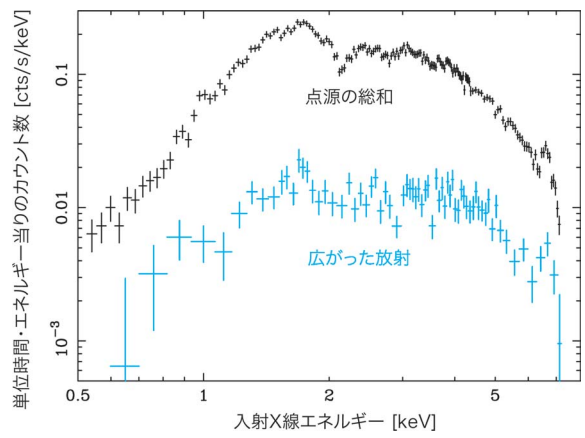


図7 図3と同様、ただし NGC 2024 の広がった放射領域のもの。

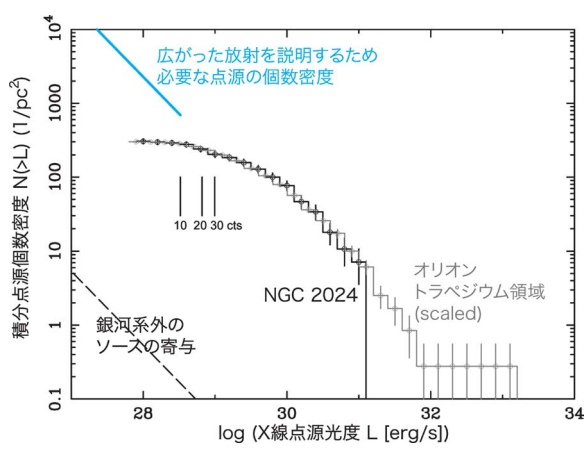


図8 図4と同様、ただし NGC 2024 の広がった放射領域のもの。

である。

点源を除去するため、筆者らはまず点源の検出を行い、全部で 301 個を検出した。そして点源の光子をきちんと除去し、広がった放射のイメージを作成して、放射が残ることを確認した。そして放射の強い図6中の点線の領域からスペクトルを抜きだした。図7に示す。広がった放射は点源に比べ1桁ほど暗いものの、十分に有意であり(4,300±100 カウント)、のっぺりとした連続成分(光子指数 ~1) および高電離した鉄からの K 輝線と思われる構造を見せる。X線光度は0.5-7キロ電子ボルトで毎秒2×10³¹エルグとNGC 6334と比べて2桁ほど暗い、高電離した鉄からの輝線

が見えるということは熱的放射も混入しているに違いないが、NGC 6334の結果によく似たのっぺりとした連続成分から、このスペクトルには非熱的放射も入っているに違いないと考えられる。

これは真に広がった放射か？やはり光度関数を用いて、暗い点源の個数を見積もることにした。図8に示す。領域の近さや観測の長さ、放射が視野中心に近いことなどが幸いし、完全検出限界は0.5-7キロ電子ボルトのX線光度にして毎秒~3×10²⁸エルグ(10カウントに相当)と小さく、NGC 6334の場合に外挿に用いたオリオントラペジウム領域の関数と遜色ない。仮に、光度にして毎秒10²⁹から10³⁰エルグの範囲でのNGC

2024 の光度関数のべきから、関数を 0 まで外挿しても、広がった放射への寄与は約 10% にしかならない。よって、やはり真に広がった放射と考えられる。

これは、これまで報告があった広がった放射の中で、最もわれわれに近い領域からのものであり、暗い点源の不定性は最も低い。すなわち、広がった X 線が大質量星の形成領域に存在することを裏づける最も有力な証拠といってもよいのかもしれない。

4. 何が広がった放射をつくるのか？

4.1 X 線の放射メカニズムとエネルギー供給量について

この広がった放射の起源は何であろうか。以下では X 線の放射メカニズムとそこから計算される必要なエネルギー供給を考えることで候補を絞っていきたい。放射が非熱的な場合および熱的な場合について順に考えてみよう。

まず放射の一部が非熱的な場合、放射メカニズムとして考えられるのは三つ、(1) 10 キロ電子ボルト以上のエネルギーをもつ電子が、星間物質によりブレーキをかけられたときに放射する X 線 (制動放射)、(2) 100 メガ電子ボルトほどのエネルギーをもつ電子によって、星間物質から出る赤外線的光が叩き上げられて出る X 線 (逆コンプトン散乱)、そして (3) テラ電子ボルトものエネルギーをもつ電子が磁場に巻きついて高速で運動するときに出る X 線 (シンクロトロン放射) である。

しかし、べき関数の光子指数がとても小さい (1 程度) ことを考えると、このうち (2) と (3) の可能性は低い。なぜなら、電子を高エネルギーに加速する際に最も一般的に考えられている衝撃波の加速では、X 線の光子のべきはいかに小さくても 1.5 にしかなれないと考えられているからである。

よって残る可能性は (1) ということになる。こ

の場合、JAXA 宇宙研の内山泰伸氏らによって示されたように²¹⁾、巨大分子雲のようにとっても密度の高い場所では、光子指数は 1 まで小さくなることできる。というのも、このような場所では、電子がエネルギーを失うメカニズムとしてはクーロン散乱が、(1) や (2) や (3) に比べ圧倒的に支配的であるからである。クーロン散乱の断面積はこのエネルギー範囲では電子のエネルギーにはほとんどよらないので、低エネルギーの電子ほどあつというまにエネルギーを失って、電子の分布それ自体がフラットになり、よってそれらが発する制動放射もフラット、つまり光子指数が小さくなるのである。

ではこの場合、どのくらいのエネルギー供給が必要なのだろうか？ 分子雲の密度を 1 cm^3 当たり千から 1 万個とすると、制動放射に大きく寄与する電子のエネルギーは約 1 メガ電子ボルト以下となる。このエネルギーでは上で述べたように、大部分の電子はクーロン散乱でエネルギーを失うので、制動放射を出す電子は X 線光度の 10^{3-5} 倍も必要となる。仮に、NGC 6334 の硬 X 線の強い領域や NGC 2024 の放射すべてが非熱的とすると、必要な電子のエネルギー供給はだいたい毎秒 10^{36} および 10^{35} エルグにも達する。衝撃波での電子の加速の効率を考えるとバルクなエネルギーとしては、最低もう 1 桁高くなるだろう。つまり毎秒 10^{37} および 10^{36} エルグとなる。

放射が熱的な場合はどうか。いま、観測された X 線の光度、X 線の像から見積もられる体積、および X 線スペクトルから測った温度の三つからプラズマの電子密度が推定できる。すると、プラズマの全エネルギーやプラズマの圧力、X 線で冷える時間を見積もることができる。NGC 6334 の熱的な放射の領域や NGC 2024 の放射すべてが熱的と考えて、これを計算してみると、放射冷却によりプラズマが冷める時間は、NGC 6334 でも NGC 2024 でも、 10^{7-8} 年程度となり、領域の推定年齢 (10^{5-6} 年) に比べ、はるかに長い。またプラ

ズマの圧力は $10^{7-8} \text{ K cm}^{-3}$ 程度と推定され、高温で高密度な HII 領域のガス圧や分子雲中の強い磁場の圧力で閉じ込めることが可能である。とすると、X線を放射しているプラズマは分子雲の中に閉じ込められており、プラズマの全エネルギーはどんどん蓄積されているのかもしれない。この場合、系の年齢でプラズマの全エネルギーを割ることで、平均的なエネルギー供給を計算できる。年齢を 10^5 年とすると、NGC 6334 の場合のエネルギー供給率は毎秒 10^{36} エルグとなる。NGC 2024 の場合も同じように、毎秒 10^{34} エルグとなる。

すなわち、放射メカニズムが非熱的であれ熱的であれ、観測された X線光度をはるかに上回るエネルギー供給が必要である。その条件は非熱的な放射のほうが 1桁以上も厳しい。

4.2 X線放射の起源は何か

役者がそろったところで、いよいよ広がった X線放射の起源について考えたい。広がった放射は明らかに大質量星の形成コアと空間的に相関しており、その星の活動と密接にかかわっているであろう。上で計算したような巨大なエネルギーをもち、かつ X線を出すほどにガスを加熱し粒子を加速しうる機構とってまず思いつくのは、やはり大質量星から出る高速の星風によって周囲に生じる衝撃波である。

図9に示すように、星風はその動圧が周囲の濃いガス（例えば HII 領域）の圧力と等しくなる位置で、強い衝撃波を生じる。衝撃波と接触不連続

面の間は高温のガスで満たされ、X線を発生する。星風は定常的に放出され続けるため、接触不連続面は膨脹を続け、星間ガス中に広がる弱い衝撃波がその前方に形成される。§1で述べたように、この説は1970年代からWeaver博士らによって研究されてきた理論である³⁾。

今、大質量星の星風のメカニカルなエネルギーは、星風の質量放出率を1年当たり太陽質量の 10^{-7} 倍、典型的な速度を毎秒 2,000 km とすると、毎秒 10^{35} エルグと計算できる。もちろんこれは星によって1桁ほど増減しうるのだが、おおまかにいって、放射が熱的な場合、上で見積もったエネルギー供給は NGC 6334, NGC 2024 とともに、領域に存在する少なくとも8個および1個の大質量星で説明することができる。

一方、放射が非熱的だとしても、超新星残骸などの類推から、こうした星風の衝撃波で粒子加速が起きている可能性は十分ありうる。このとき、エネルギー供給の面からすると、§4.1で見たように、熱的な場合に比べ、必要なエネルギーがさらに1桁以上も上がるため、やや厳しい。星形成領域の星はとても密集しているので、別々の星風との間で衝撃波が起きることで強力な加速が起きていたり、分子雲に深く埋もれた未発見の大質量星がいるのかもしれない。

ちなみに今、衝撃波の直後での最大温度は、毎秒 2,000 km の星風の場合、6千万度ほどであり、観測された広がった放射の温度（数千万度）をおおまかに説明できる。この熱いガスは、接触不連続

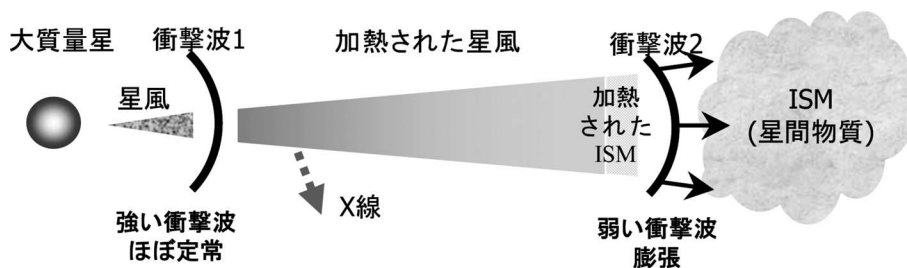


図9 大質量星からの高速の星風によって周囲に形成される構造。Weaver, et al., 1977 などに基づく³⁾。

続面を通じ周囲のより冷たいガスと熱伝導を通じて冷え、温度は衝撃波から離れるにつれて下がるので、われわれが分子雲を通し見ているのは熱いガスの中でも波面に近い温度の高い部分と考えられる。

膨脹するこの熱いガス（Hot Bubble と呼ばれる）のサイズ（すなわち中心の OB 型星から接触不連続面までの距離）は、星風のエネルギー供給量と押し出された周囲のガスの熱エネルギーから計算することができる。上で仮定した星風の質量放出率や速度、さらに周囲のガスの圧力をプラズマの閉じ込めに必要な 10^7 K cm^{-3} 、星風が放出されてきた年齢を 10^5 年とおくと、サイズは 3 光年ほど見積もられる。つまり NGC 6334 や NGC 2024 の広がった放射のサイズ（それぞれ 15×30 光年および 2 光年ほど）は、領域内の大質量星の数（それぞれ少なくとも 8 個および 1 個）を考えると、説明がつく。

以上のように星風説は今のところ NGC 6334 および NGC 2024 の広がった放射をおおまかに説明しうようである。では、温度の違いや非熱的放射のありなしは何で決まるのだろうか？ 一つの候補は、衝撃波の強さ（マッハ数）である。NGC 6334 の軟 X 線領域は、吸収が低く温度も低い。一方で、吸収の強い NGC 6334 の硬 X 線領域は、よりハードな放射を見せた。つまり、周囲のガス圧が小さいと、衝撃波のマッハ数が小さくなるため、十分にガスを加熱または加速できないのかもしれない。M17 や RCW 38 などでの放射の違いもひょっとするとこうした衝撃波の強さによって分類することができ、統一的に説明がつくかもしれない。

5. 今後の展開

筆者らは NGC 6334 および NGC 2024 のチャンドラデータを解析し、この 2 領域に広がった X 線放射を発見した。このことは冷たい分子雲の内部にできた若い大質量星の近辺は、数千万度の高

温のプラズマが満ちていたり、また高エネルギーの電子の加速が起きていたり、じつは非常に活動的な場所であることを示唆する。こうしたプラズマや高エネルギー粒子から出た X 線は周囲の物質に吸収されガスの電離を起こし、周囲での星形成へ影響を及ぼすと考えられる。大質量星の形成環境の、隠された高エネルギー的な側面がかいま見えたのかもしれない。

いまわれわれはこの大質量星の形成領域からの広がった X 線放射が、じつは銀河面に沿って存在する謎の広がった X 線、いわゆるリッジ X 線放射²²⁾⁻²⁵⁾に一部、寄与しているのではないかと考えつつある。リッジ X 線放射はその発見から 20 年間たった今でもその起源がわからないまさに謎の放射である。宇宙研の海老沢 研博士らはチャンドラを使い、これが暗い点源の集合ではなく真に広がった放射だと結論づけた²⁴⁾。しかし、Revnivtsev 博士らは赤外線イメージとの比較から、暗い点源なのではないかと主張しており、結着はついていない²⁵⁾。大質量星の形成領域（すなわち巨大分子雲）はリッジ放射と空間的によく関連しており、広がった放射が重ね合わさって、リッジの一部に寄与していることは十分にありうる。今後よりしっかりと両者の関係を詰めていきたい。

さらに今回の結果は非熱的な X 線放射が大質量星の形成領域に存在することを示唆する。そのエネルギー総量や加速の最大エネルギーを知るためには、X 線よりもエネルギーの高いガンマ線での観測が必要となる。2005 年に打ち上げられた日本の「すざく」衛星には、著者も開発に深くかかわった硬 X 線検出器が搭載されており、イメージは取れないものの、10–700 keV においてかつてない感度でスペクトルを取得できる。

最近、ESA のガンマ線衛星インテグラルによって、NGC 6334 の広がった硬 X 線の位置から 20–100 keV のガンマ線が検出され、話題になっている^{26), 27)}。Bykov 博士らは背景の活動銀河核の可能

性とともに、べき関数で表されるスペクトルの光子指数が ~ 1 とフラットであることから、筆者らが指摘した非熱的な広がったX線が起源かもしれないと指摘している²⁷⁾。例えば NGC 6334 をチャンドラと「すざく」で同時に観測し、前者で点源からの熱的な成分を抑え、後者で非熱的成分を検証するという手を使えば定量的に非熱的放射が検証できるだろう。「すざく」によって大質量星の形成領域の加速現象が明らかになることをわくわくしながら待ちわびているところである。

謝 辞

本稿は、筆者が東京大学在学時にまとめた博士論文およびその後の投稿論文に基づくものです²⁸⁾, ²⁹⁾。ご指導および多大な助言をいただいた牧島一夫教授と国分紀秀助手に深く感謝します。また度々ご相談をいただいた国立天文台の関本助教教授、宇宙研の松崎助手に感謝いたします。さらに快適な研究環境を提供していただいた東京大学の牧島研究室ならびに、現在所属している宇宙研の満田研究室、山崎研究室の皆様に感謝いたします。大学院および現在、援助をいただいている日本学術振興会にも深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Giacconi R., et al., 1974, ApJS 27, 37
- 2) Ku W. H. M., Chanan G. A., ApJ 1979, 234, L59
- 3) Weaver R., et al., 1977, ApJ 218, 377
- 4) Yamauchi S., et al., 1996, PASJ 48, 719
- 5) Matsuzaki K., Ph.D. thesis, 1999, University of Tokyo
- 6) Sekimoto Y., et al., 2000, PASJ 52, L31
- 7) Getman K. V., et al., 2005, ApJS 165, 319
- 8) Townsley L., et al., 2001, AAS 19912404
- 9) Townsley L., et al., 2003, ApJ 593, 874
- 10) Wolk S. J., et al., 2002, ApJ 580, L161
- 11) Yusef-Zadeh F., et al., 2002, ApJ 570, 665
- 12) Wang Q. D., et al., 2002, Nature 415, 148
- 13) Moffat A. F. J., et al., 2002, ApJ 573, 191
- 14) Yamauchi Y., et al., 2000, PASJ 52, 1087
- 15) Skinner S., Gagne M., Belzer M., 2003, ApJ 598, 375

- 16) <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/images-hii.html>
- 17) Loughran L., et al., 1986, ApJ 303, 629
- 18) Feigelson E. D., Getman K. V., 2005, astro-ph/0501207
- 19) Feigelson E. D., et al., 2002, ApJ 594, 258
- 20) Bik A., et al., 2003, A&A 404, 249
- 21) Uchiyama Y., Ph.D. thesis, 2002, University of Tokyo
- 22) Kaneda H., et al., 1997, ApJ 491, 638
- 23) Valinia A., et al., 1998, ApJ 505, 134
- 24) Ebisawa K., et al., 2005, ApJ 635, 214
- 25) Revnivtsev M., et al., 2005, astro-ph/0510050
- 26) Bassani L., et al., 2005, astro-ph/0510338
- 27) Bykov A. M., et al., 2005, astro-ph/0512627
- 28) Ezoe Y., et al., 2006, ApJ 638, 860
- 29) Ezoe Y., et al., ApJ, submitted

Investigation of Diffuse X-Ray Emission Associated with Formation of Massive Stars Yuichiro EZOE

Department of High Energy Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: Massive stars influence the interstellar medium in our Galaxy profoundly by strong UV lights and stellar winds. Since 1970's, shocks between stellar winds and ambient medium are thought to produce diffuse X-ray emission. If true, this phenomenon must be very important to understand the massive star formation. Thanks to *Chandra*, deep survey of diffuse X-ray emission in massive star-forming regions is now becoming a new topic. We have analyzed the *Chandra* data of two representative regions, NGC 6334 and NGC 2024. We have shown that the diffuse emission certainly exists in both objects, and that the emission maybe a mixture of thermal and non-thermal components.