

# 論文内容の要旨

## Investigation of Diffuse Hard X-ray Emission Associated with the Formation of Massive Stars

(大質量星の形成にともなう  
ディフューズ硬X線放射の研究)

江副 祐一郎

### はじめに

大質量星は莫大な重力エネルギーと運動量を解放しながら誕生し、主系列星に成長すると強い紫外線で周りの物質を電離し、また数千  $\text{km s}^{-1}$  もの高速の星風を通じて、重元素と運動エネルギーを解放するなど、中小質量星 ( $\lesssim 10$  太陽質量) に比べ、銀河の星間物質にはるかに多大な影響を与える存在である。しかし成長が早く、濃い分子雲に埋もれているといった理由から観測が難しく、星としての初期段階において、冷たい分子雲ガスの中でどのような物理現象が起きているのかについてはよく分かっていない。

1974年 *Uhuru* 衛星によってオリオン星雲からX線放射が観測されて以来、透過力の強いX線はこうした若い大質量を探る手段として確立されてきた。プラズマ温度に直すと  $10^{6-8}$  K ものX線の放射それ自体が、数十Kの冷たい分子雲の中で予期せぬ高エネルギー素過程が活発に進行していることを示している。さらに驚くべきことに *Einstein* 衛星やつづく日本の「あすか」衛星などによって、X線の放射源として星とは別に”真に広がった”(ディフューズ)成分があることが示唆された。理論的には大質量星からの星風が周囲の物質とぶつかって生じる衝撃波が熱的なディフューズ放射を形成すると考えられたものの、空間分解能やエネルギーバンドが限られていたため、暗い点源の集合である可能性を棄却することはできなかった。仮にディフューズ放射があるとして、その起源が星風の衝撃波がであるならば、超新星爆発に伴って見られるように非熱的な放射、すなわち高エネルギー粒子の加速も同時に起きていると考えるのが自然である。従って大質量星の形成領域からのディフューズX線放射の解明は、高エネルギー宇宙物理における重要課題である、宇宙線の生成起源と加速領域の特定にも影響を及ぼす可能性を持つ。

本論文では、このような視点から、秒角の角度分解能を誇る最新の X 線衛星 *Chandra* を用いて、大質量星の形成に伴うディフューズ X 線放射の存在を検証し、その放射機構とエネルギー源を明らかにすることを目的とする。

## ディフューズ硬 X 線放射の発見

私は「あすか」衛星によってディフューズ硬 X 線放射の存在が示唆された、代表的な大質量星の形成領域 NGC 6334 を *Chandra* 衛星で観測した。そして点源以外に、見かけ上  $5 \times 9 \text{ pc}^2$  の大きさに広がって見える放射を発見した (図 1 上)。検出された 800 個の点源の寄与を定量的に差し引いた "Excess Emission" (図 1 下) においてもこの放射ははっきりと検出できしており、分子雲とよく相関している。さらにバックグラウンドを差し引いても、統計的に十分有意であり ( $> 20\sigma$ )、その X 線光度は  $2 \times 10^{33} \text{ ergs s}^{-1}$  と、点源の総和の半分にも達することが分かった。次いで、この放射が検出されなかった暗い点源の集合で説明つくのかどうか、検出点源の光度関数を用い、暗い点源の寄与を見積もったところ、広がった放射の約 90% が真に "ディフューズ" であるという結論を得た。すなわち大質量星の形成に伴うディフューズ硬 X 線放射が確かに存在するというを示すことができた。

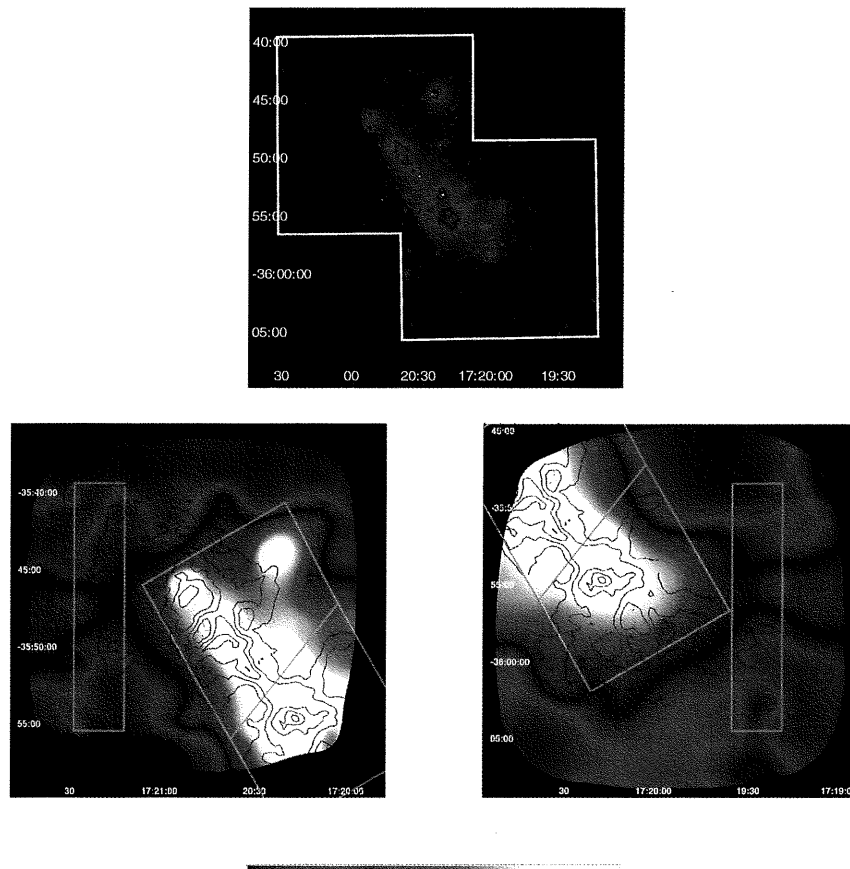


図 1: (上) *Chandra* 衛星による NGC 6334 の X 線イメージ (2-8 keV)。2 回の観測を重ねて表示。白枠は視野。(下) 上から点源を引いたディフューズ X 線放射イメージ。観測毎に示した。実線は CO のマップ。

さらにディフューズ放射の放射機構とエネルギー源に迫るべく、作成した Excess Emission イメージを用いて、場所毎の X 線スペクトルの解析を行なった。ディフューズ放射の X 線スペクトルは場所により異なり、分子雲の薄い部分 (水素柱密度にして  $\lesssim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) では

1-10 keV の熱的プラズマ放射で表され、一方、分子雲のコア部 ( $\approx 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) には非常にフラットな光子指数 ( $\Gamma \sim 1$ ) のべき関数スペクトルが見られた (図 2)。熱的な放射の可能性が完全に棄却できるわけではないが、これらのフラットなべき関数スペクトルは非熱的放射を強く示唆する。すなわちディフューズ放射は場所によって熱的と非熱的放射が違う割合で混じっていると考えられる。

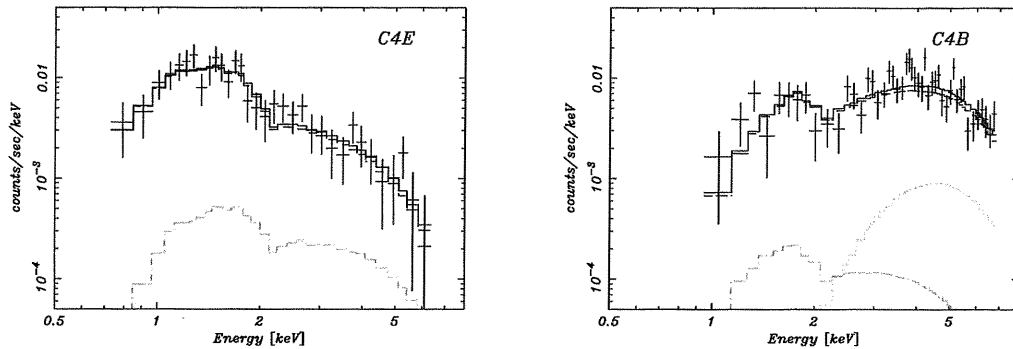


図 2: *Chandra* 衛星による NGC 6334 のディフューズ放射の場所毎のスペクトル (左 分子雲の薄い部分、右 濃い部分)。緑線は領域内の点源からの洩れだし。

NGC 6334 での発見をより確かなものにするため、私はさらに我々から最も近い大質量星の形成領域の 1 つ NGC 2024 の *Chandra* データを解析し、NGC 6334 と同様に、統計的に有意なディフューズ放射を検出した。X 線光度は  $1 \times 10^{31} \text{ ergs s}^{-1}$ 、広がり直径は 1 pc ほどで、分子雲の濃い場所によく一致する。スペクトルは NGC 6334 の分子雲の濃い場所のものと同様に、光子指数 ( $\Gamma = 0.7 \pm 0.3$ ) のべき関数スペクトルを示し、非熱的な放射と思われる。大質量星の形成に伴うディフューズ硬 X 線放射の存在は、より一層確かなものとなった。

以上の結果をふまえて、ディフューズ放射の場所毎の水素柱密度と表面輝度の関係と比較したところ、明らかな正の相関を見つけた (図 3 上)。さらに水素柱密度と温度 (連続成分のハードネス) にも正の相関が見られる (図 3 下)。これらは放射の起源と密接に関係しているものと考えられ、放射機構やエネルギー源を考える上での大きな手がかりとなる。

## 放射機構およびエネルギー源

以上の観測事実に基づき、ディフューズ放射の起源を考察した。まず見つかったフラットなべき関数スペクトルは、非熱的な放射メカニズムが強く示唆される。しかし、そのスペクトルの平坦さはシンクロトロンや逆コンプトン放射では説明が難しい。一方、高密度ガスではクーロン損失で、低エネルギー電子はより早くエネルギーを失うため、sub-GeV 領域の電子からの制動放射のスペクトルは、光子指数 1 のべき関数となると理論的に示されており、観測を旨く説明できる。すると NGC 6334 では少なくとも  $\sim 10^{36} \text{ ergs s}^{-1}$ 、NGC 2024 では  $\sim 10^{35} \text{ ergs s}^{-1}$  もの膨大なエネルギー供給がなくてはならない。また仮にこれらの領域も含め、全てのディフューズ放射が熱的なプラズマからの放射だとしても、NGC 6334 では  $\sim 10^{35-36} \text{ ergs s}^{-1}$ 、NGC 2024 では  $\sim 10^{33-34} \text{ ergs s}^{-1}$  ものエネルギーがやはり必要となる。一体、この莫大なエネルギーは何によって与えられているのだろうか？

数ある大質量星とその形成に伴う現象の中で、こうした莫大なエネルギーと X 線を出しうるプラズマの加熱と粒子加速を可能にするのは、 $1000 \sim 3000 \text{ km s}^{-1}$  の高速の星風が尤もらしい。そこで、若い大質量星が放出する星風が、濃い周囲の物質 (HII 領域など) とぶつかっ

て生じる衝撃波で生じるプラズマや高エネルギー粒子が原因と考えた。するとそれぞれの領域に期待される個数の大質量星の星風の運動エネルギーは上のエネルギーを説明することができ、高速の星風による衝撃波は高温の熱的放射や非熱的放射も説明しうる。さらに、観測したディフューズ放射のサイズも、徐々に広がってゆく星風の予想される大きさととよく一致する。見つかった水素柱密度と表面輝度との相関(図3上)も、理論的に説明がつき(図3上点線)、水素柱密度と温度に見えたもう一つの相関も、分子雲の濃い環境ではより強い衝撃波が形成され、粒子加速とそれに伴う非熱的放射が卓越する、という自然な解釈と一致する。このように星風の衝撃波説は、我々の結果を非常に旨く説明できることがわかった。

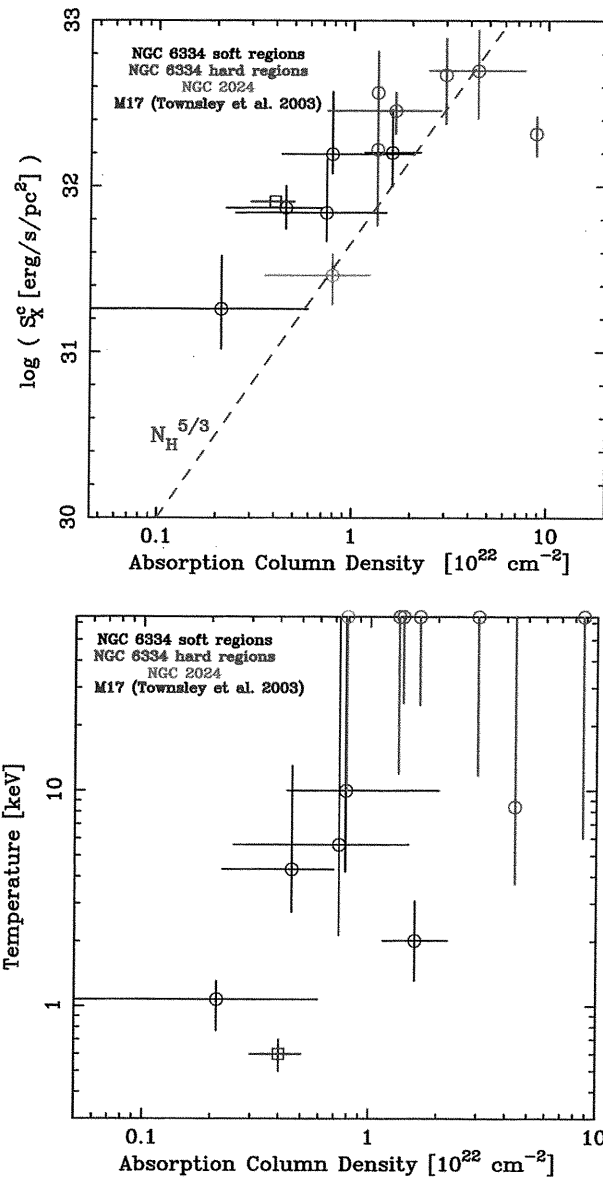


図 3: (上) ディフューズ放射の場所毎の水素柱密度と表面輝度の関係。(下) 水素柱密度と温度(連続成分のハードネス)の関係。黒が NGC 6334 の分子雲の薄い領域、赤が NGC 6334 の分子雲の濃い領域、緑は NGC 2024 全体。青はディフューズ放射が強く示唆される他の大質量の星形成領域 M17 の値 (Townesley et al. 2003 より引用)。上図の点線は星風説で予想される巾。