

論文内容の要旨

論文題目: Investigation of X-ray Flares from Intermediate Mass Stars
(中質量星からの X 線フレアの研究)

氏名 柳田 健之

X 線フレアは、小質量 ($< 2M_{\odot}$) 星では一般的に見られる爆発現象で、とくに若い星では活発である。爆発に伴い放射される強烈な X 線は、星やその周囲の惑星系に対して、物理的、化学的、鉱物学的、そして生物学的にさえも多大な影響を与えると考えられる。さらにこれらは、宇宙における磁気的プラズマの爆発現象を調べるうえで、非常に適した現象である。そのため、このようなフレアが小質量星でしか起こりえないか否かを調べることはきわめて重要である。もし、フレアが小質量星でしか起きえないならば、太陽を始めとした小質量星の星系と、それ以外の中質量星を中心とした星系では、周辺環境にかなりの差異が生じる可能性がある。

$10M_{\odot}$ 以上の大質量星では光球には対流層はほとんど発達せず、これに代わり、放射層が卓越する。この放射層からは強い恒星風 (~ 1000 km/s) が吹き出しており、それに伴うショック加熱によって定常的に ~ 0.5 keV 程度の X 線が放射されている (Lucy & White 1980)。これに対して小質量星では、コロナの磁気活動にもとづく X 線が放射され、その強度は前述のフレアに代表されるように、大きく変動する。こうした活動は星が若いほど盛んで、コロナやフレアの温度も高い。これらの中間に位置する中質量星 ($2 \sim 10M_{\odot}$) は、対流が弱いために磁場が弱く、また恒星風の速度も大質量星よりは一桁程度遅いため、X 線放射はこれまで観測的にも理論的にも、ひじょうに弱いと考えられてきた。

1990年代に、*ROSAT* 衛星による太陽近傍の中質量星の系統的な研究により、magnetic Bp/Ap 型星や、中質量星を主星にもつ Algol 型星など、特殊な中質量星は頻繁にフレアを起こすことが発見された (e.g., Babel & Montmerle 1997)。さらに「あすか」衛星により、若い中質量星である Herbig 型星は強い X 線源であり、その強度は時間変動をも起こすことが判明した (Hamaguchi 2001)。しかしながらこれらの結果に対しては、空間分解能の不足により、近傍の若く活動的な小質量星からのフレアが混入しているだけで、中質量星そのものは X 線源ではない (e.g., Berghofer et al. 1997) という反論が、繰り返し提示されてきた。そして実際に「あすか」で観測された強い X 線を放射する中質量星のいくつかは、近年の高空間分解能観測によって、強い X 線源の小質量星と弱い X 線源の中質量星に分解された (Stelzer et al. 2005)。本論文の目的は、空間分解能 0.5" という、過去の X 線衛星の中で最高の性能を誇る *Chandra* 衛星を用い、系統的に中質量星からのフレアを解析し、その起源を探ることにある。

我々は、*Chandra* 衛星の公開データのうち、ACIS-I 検出器を用い、62 の星形成領域のデータ 76 セット (18 キロ秒以上の観測時間) を系統的に解析した。結果として、のべ約 19000 個の X 線源が検出され、近赤外線データ (2MASS) を用いた対応星探して約 7 割 (のべ 13500) の一致を得た。これらに対し、2MASS データに基づく、 J vs $J - H$ の色等級図を用いて絞りこみを行い、約 5000 個の中質量星候補 (= possible IMS) を得た。さらに、X 線で 200 カウント以上が検出され、かつ Simbad データベースで光学的にスペクトル型が判明している、という条件を課すことで、221 個の X 線源を抽出し (= Primary Sample)、時間変動解析を行った。その結果 30 天体 (= Variable Sample) が χ^2 検定で 95% 以上の変動を示した。内訳は大半が B および A 型星で、一部 O8-9 型星も含まれていた。我々は、これらに対しフレアの形状を模擬した関数で光度曲線の解析を行い、立上り時間 < 減衰時間、およびフレアピーク強度が静穏時の強度の 3 倍以上という条件のもとで、11 個の天体から 15 個のフレアを選び出した。フレア天体のスペクトル型は、B0 型から A2 型までほぼ均等に分布している。

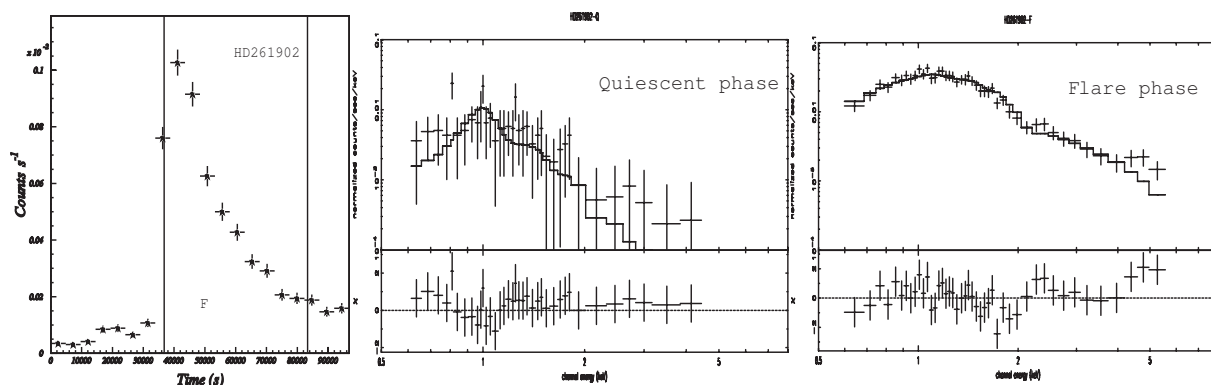


図 1: B8 型星 HD261902 の 0.5–8.0 keV の光度曲線 (左)、静穏時のスペクトル (中)、フレア時のスペクトル (右)。

図 1 に示すように、我々は、11 個の天体からの 15 個の X 線フレアに対し、光度曲線を参照して、フレアと静穏時をそれぞれ時間ごとに切り出してスペクトル解析を行い、プラズマ温度 (kT) や emission measure (EM) を求めた。スペクトルは熱的プラズマのモデルでよく再現され、フレアの方が静穏時よりも高い kT および大きな EM を示した。

磁気フレアにおいては、太陽から恒星フレアに至るまで、 kT と EM の間には、図 2 に示すように、観測的に強い相関が成り立つことが知られている。この関係は、おもに熱伝導による冷却とリコネクションによる加熱の釣り合い、さらに磁場とコロナガスの圧力の釣り合いを考えることで導かれるスケーリング則 (Shibata & Yokoyama 2002) で、よく説明される。そこで我々は得られた 15 個のフレアを、図 2 の kT - EM 平面上にプロットし、他のフレア天体と比較するとともに、スケーリング則を用いて、フレアの磁気ループ長や平均磁場を推定した。図 2 で示された等高線は、コロナの電子密度として、多くの若い星の平均の値である、 $n = 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ (Imanishi 2003) を仮定している。

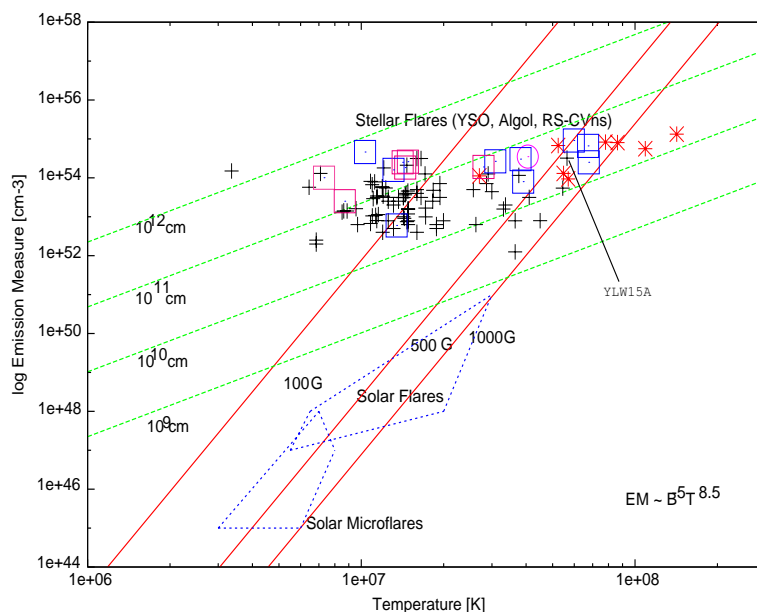


図 2: 星のフレアの kT - EM 図。本研究にもとづく B 型中質量星 (青四角) および B 型中質量星 (赤四角) の結果を、他の研究による若い小質量星 (黒)、近接連星 (赤*)、および magnetic-Bp/Ap 型星 (ピンク丸) のフレアと比較したもの。電子密度を $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ と仮定してスケーリング則から求めた、磁場強度 (赤い実線)、および磁気ループ長 (緑の破線) も示す。

図 2 において、中質量星は高い EM を持ち、その結果、フレアループ長 (緑線: 中質量星は典型的に $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}$) は、単一の星からのフレアとしては大きいことが分かった。また、得られた磁場 (赤線: $10 \sim 1000 \text{ G}$) は、他波長による、磁場を持つ特殊な中質量星のサーベイ結果とほぼ同じ値であった (Bagnulo et al. 2006)。今回得られた中質量星のデータは図上で、 $2 \times 10^7 \text{ K}$ を境に二つに別れており、おおよそ低温側が (赤四角) A 型星、高温側が (青四角) B 型星と対応している。高温側のフレ

アは近接連星系のフレア (赤*) と似た分布をもつ一方で、低温側のフレアは、若い小質量星のフレアと似たパラメータを示している。若い星も同様に二種類に別れているが、これも高温側は RS-CVn 型連星をなしている可能性が高いと考えられる。近年 VLT の観測により、若い RS-CVn だということが分かった YLW 15A がこの領域に存在していることも、この解釈を支持する。

以上の結果をもとに、我々は中質量星フレアの起源を、下記の 4 つの可能性から考察した。

1. 主系列の小質量星が視線方向に存在し、もしくは主星とは分解されておらず、それがフレアを起こしている。すなわち、中質量星起源ではない。
2. 上と同様の状態だが、フレアは見えない若い小質量星のが起こしている (通念化している解釈)。
3. これらの中質量星は Algol 型星のような近接連星を成しており、連星起源の磁気活動でフレアが生じている。
4. これらの中質量星は magnetic Bp/Ap 星のように、単独で磁場を持っており、そのため X 線フレアを起こす。

ケース 1 に関しては、得られた $L_X \sim 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ が高すぎることから棄却される (太陽では $10^{27} \sim 10^{28} \text{ erg s}^{-1}$)。ケース 2 は一般的に考えられている解釈で、今回の低温側のフレアに関しては完全に棄却できない。しかし、 L_X/L_{bol} 比が高すぎることや、これらの内の幾つかは近傍 (160 ~ 450 pc) の天体であり、実距離に換算して数百 AU 程度までは分解できているはずであることなどから、観測の全てを説明するには無理がある。ケース 3 は従来は指摘されなかった解釈であり、図 2 上の、高温側のフレアにはよく当てはまると考えられる。実際に高温側の 7 フレアのうち、2 回のフレアを起こしている BM Ori は、Algol 型星であることが可視光観測より判明している (Vitrichenko et al. 2006)。この場合、これまでの研究によりフレアは星同士、もしくは星と円盤をつなぐ磁場によって起きている可能性が高く、ループ長 $\sim 0.01 \text{ AU}$ も連星距離 (たとえば Algol では $\sim 0.065 \text{ AU}$) と非常に近い値を示している。最後のケース 4 は、そもそも今回の観測では、星形成領域の中質量星がかなり高い確率で X 線を放射していること、それらは 11 個の天体に限らず、X 線とボロメトリックな光度の比が、主系列の中質量星に比べて有意に大きいことなどから、有力な可能性として残る。今回の低温側のフレアは、この起源である可能性が高い。このような磁場があるとすれば、原始星の段階で作られた磁場の名残であろう。

本論文では、以上のように、中質量星からのフレアに対し、初めて系統的な研究を行った。その結果、隠れた伴星がフレア源であるとする従来の通説では観測の全容を説明できず、若い中質量星は、近接連星をなしたり、強い磁場を持つなどにより、かなり活発な X 線放射を行うことが明らかになった。