

論文内容の要旨

論文題目: X-ray Study of Planetary Nebulae
(X線をを用いた惑星状星雲の観測的研究)

氏名 村島 未生

惑星状星雲は太陽質量の約8倍よりも小さい初期質量をもつ中質量星の終末期の姿である。超新星残骸と違い、星の物質がしずかに放出されたものなので恒星内部での元素合成物質がそのまま記録されていると考えられ、中質量星の元素合成を調べる上で重要な天体である。そのため、電波から赤外線、可視光、紫外線まで、多波長での観測がおこなわれてきたが、星雲を構成する物質は、中質量星の進化過程で対流によって物質が混ざったあとを見ており、元素合成のある決まったフェーズを取り出すことは難しい。そこで我々は、新しい手段として惑星状星雲からのX線放射に注目した。

惑星状星雲からX線が放射されることは、1970年代後半に形成モデル (Interactive Stellar Winds model; ISW) より予言されていた。これは図1に示すように、中心星が高温に進化すると高速の星風 ($\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$) が生じ、漸近巨星分枝で星が放出した星周物質を掃き集めてリング状の星雲を形成すると説明している。この高速の星風によって衝撃波が形成され、それによって温められたガス (図中の領域 b) はX線を放射するほど高温 ($\sim 1 \text{ keV} \sim 1 \times 10^7 \text{ K}$) になると予測される。実際に1980年代後半より惑星状星雲からのX線が観測され、最近の5年間で、米欧のチャンドラ衛星、ニュートン衛星によって、それらのうちのいくつかは、可視光シェルに一致して確かに広がっていることが明らかになりつつある。

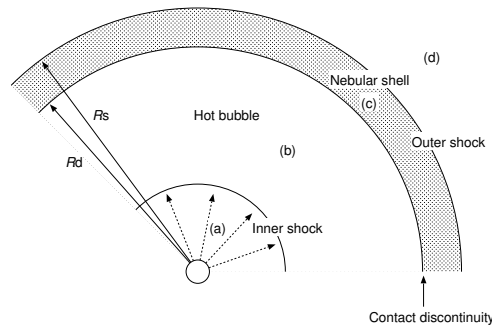


図 1: ISW モデルの概要図 (Kwok 2000; Volk and Kwok 1985)。領域はそれぞれ、(a) 高速の星風、(b) 衝撃波によって加熱されたガス、(c) 星雲、(d) AGB 残骸を示している。

X 線を放射する高温プラズマは、ISW モデルに沿って考えれば中心星が最後に放出する物質を見ていることになり、すなわち、中心星が最後に合成した重元素の組成を反映していると期待される。本論文の目的は、惑星状星雲からの X 線の分光により元素組成比 (Abundance ratio) を得て、中質量星の元素合成の最終段階であるヘリウム燃焼の生成物、すなわち炭素、窒素、酸素、およびネオンの組成比を観測的に得ることである。しかし、惑星状星雲からの X 線は光度が低く、かつ検出器の感度 (有効面積) もエネルギー分解能も不足する低エネルギー側に集中しており、統計の良い高エネルギー分解能のスペクトルを得ることは、従来の観測機器では難しかった。そこで我々は、多数の天体を系統的に調べることに同時に、軌道に上がったばかりの新しい衛星を用いて観測を行うことを計画した。

まず我々は惑星状星雲からの X 線放射を系統的に調べるため、低エネルギー側での感度が高いチャンドラ、ニュートン両衛星で観測されたすべての惑星状星雲の公開データを解析した。しかし、この 2 つの衛星は、エネルギー分解能は十分ではなく、炭素、窒素、酸素からのラインを分解できないため、0.37 keV に特性 X 線を示す炭素の元素組成を仮定する必要がある。そこで我々は、2005 年 7 月に打上げられた日本の 5 番目の X 線観測衛星「すざく」を用いて、X 線で最も明るい惑星状星雲、BD +30° 3639 の観測を行った。この惑星状星雲のスペクトルには「あすか」によって強いネオンの輝線 (0.91 keV) が発見され、チャンドラ衛星によって炭素、窒素、酸素からの輝線とみられる幅の広い構造がみえている。「すざく」に搭載されている X 線 CCD カメラ、XIS-1 は 0.3 keV までの低エネルギー側で、高い感度と同時に優れたエネルギー分解能を実現している。これを用いれば、0.37 keV の炭素の輝線と、0.56 keV、0.65 keV の酸素の輝線を初めて分解することができるはずである。また、XIS は全部で 4 台搭載されており、他の 3 台 (XIS-023) も 0.4 keV まで観測できるため、酸素とネオンの輝線を統計良く測定することができる。

X 線分光に先立って、その放射起源を系統的に理解するため、チャンドラ、ニュートン衛星で観測された 21 の惑星状星雲の公開データから、X 線を放射している 14 天体を選んだ。そのうち 8 天

体が広がった X 線放射を持っていることを確認し、残りの天体では、チャンドラ衛星の高空間分解能 ($0''.5 \sim 100 - 800 \text{ AU}$) でも分解できない点状の X 線放射が中心星の位置に検出された。また、2 つの天体からは、広がった放射と点源の両方が検出された。これら 14 天体のうち統計の良いスペクトルの得られた 8 天体について詳細に解析を行った結果、広がった X 線放射のスペクトルは制動放射と輝線から成る高温プラズマの放射でよく説明でき、典型的な温度と X 線光度は $\sim 0.2 \text{ keV}$ 、 $1 \times 10^{31} \text{ erg s}^{-1}$ であった。X 線スペクトルからはプラズマの物理量を得たり、エネルギー収支を調べることができ、その結果は ISW モデルとほぼ一致する。このことは、惑星状星雲の X 線放射物質が中質量星の最終段階を見せてくれるという我々の考えを支持するものである。一方で、中心星に付随した点状の X 線放射も高温プラズマで説明できるが、温度やプラズマの質量などが広がった X 線放射とは異なるため、同一の放射メカニズムであるという確証は今の時点では無い。

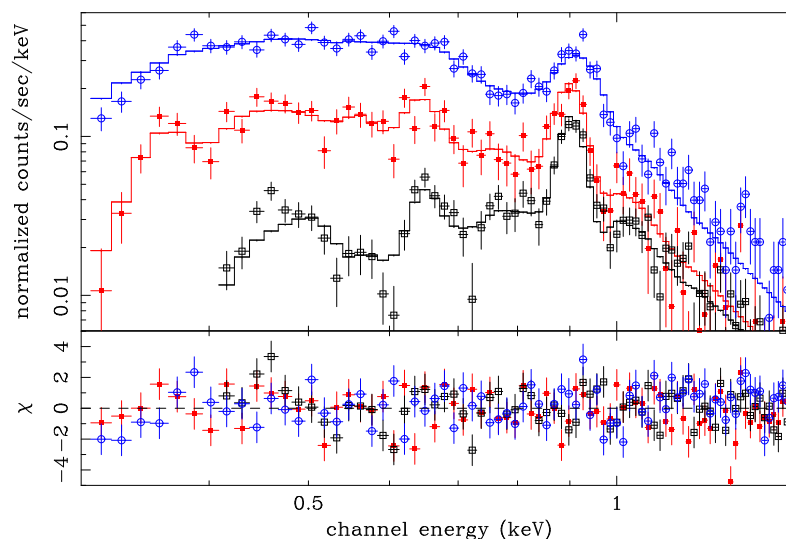


図 2: BD +30° 3639 のチャンドラ衛星 (青)、「すざく」 XIS-1 (赤)、XIS-023 (黒) で観測した 0.3–1.5 keV のスペクトル。それぞれの検出器の応答関数が含まれている。同時フィットのモデルを実線で重ね、下のパネルに残差を示す。

惑星状星雲からの広がった X 線放射が ISW モデルにもとづいた高温プラズマで理解できると分かったので、次に、本論文の目的である元素組成比を決定するべく「すざく」で観測した BD +30° 3639 のスペクトルを解析した。図 2 に赤で示したように、XIS-1 のスペクトルには、0.37 keV 付近に炭素の強い輝線がはっきりと検出されている。また、XIS-023 のスペクトルにも分解された 0.65 keV の酸素の輝線が見えている。これらの輝線は、同図に青で示したチャンドラ衛星によるスペクトルでは、0.3–0.7 keV に幅の広い構造がみえるだけで分解できていなかった。こうして輝線を分解できたことにより、C/O、N/O、および Ne/O の元素組成比を仮定を置くことなく求めることができた。その結果、太陽組成比を 1 として、C/O ~ 95 、Ne/O ~ 5.5 、N/O ~ 3.3 となり、炭素が非常に多い組

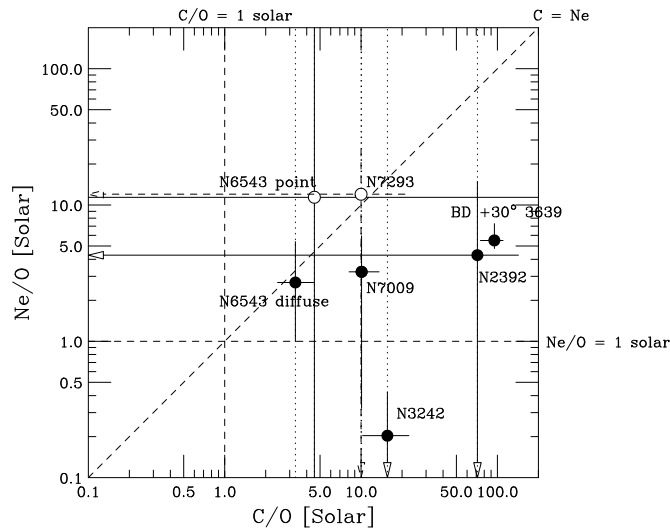


図 3: それぞれの惑星状星雲の元素合成比、C/O と Ne/O をプロットした図。黒丸は広がった X 線放射、白丸は中心星に付随した点状の X 線源を示す。

成比が明らかになった。BD +30° 3639 の「すざく」の結果と、チャンドラ、ニュートン衛星から求めた他の惑星状星雲の結果をあわせて図 3 に示す。すべての天体において、酸素やネオンにくらべて炭素が多い。また BD +30° 3639 といくつかの天体は太陽組成比にくらべて有意に大きい Ne/O を示している。こうした特徴的な元素組成比パターンにはヘリウム燃焼の生成物の組成比が表れている可能性が高く、元素合成の理論と定量的に比較するための新しい材料となる。

以上のように、本論文では、惑星状星雲からの X 線放射の系統的な解析をおこなった。また、「すざく」による BD +30° 3639 の観測により、初めて輝線を分解し、炭素が非常に多い元素組成比を明らかにした。これにより、惑星状星雲からの X 線によるプラズマ診断が開始され、中質量星の元素合成を探る新たなツールを得た。その第 1 例である BD +30° 3639 の結果は、恒星内部の元素合成を知るための新しい観測事実を提供するものである。