

論文内容の要旨

論文題目: **Anisotropic Transfer of Resonance Photons in
Hot Plasmas on Magnetized White Dwarfs**
(強磁場白色矮星に立つ高温プラズマにおける
共鳴光子の非等方的な伝播過程)

氏名 寺田 幸功

強い磁場を持つ白色矮星 (Magnetized White Dwarf; MWD) に物質が降着すると、白色矮星 (WD) の表面付近で形成されるショックによって重力ポテンシャルが解放され、数十 keV 程度のプラズマで満たされた降着円筒が作られると考えられている。このプラズマからは、熱的な電子による制動放射に加え、鉄などのイオンから放射される輝線とがみられる。典型的な降着円筒では図 1 に示すように、プラズマは、Compton 散乱に対しては光学的に薄い、輝線に作用する共鳴散乱に対しては光学的に厚くなっている。このように光学的に薄い素過程と厚い素過程とが共存するプラズマでは、光学的に厚い極限 (黒体輻射) や薄い極限のプラズマに比べ、複雑な輻射の輸送が効くので、その放射機構を理解するのは容易ではない。しかし、ひとたび輻射輸送が把握できれば、それはプラズマを診断する上で強力な道具となるはずである。本論文では、白色矮星の降着円筒を伝搬する共鳴光子に異方性を与える、新しい素過程を提案し、それを計算機シミュレーションおよび X 線衛星による観測を用いて検証する。

X 線衛星「あすか」による観測で、MWD と主系列星との連星系である polar から、ひじょうに強力な高電離鉄の K_{α} ラインが発見された (Terada et al. 1999; Ishida et al. 1998; Misaki et al. 1996)。POLE (Pole-on Line Emitter) と名付けられたこれらの天体は、図 2 に示すように、鉄 K_{α} ラインの等価幅 (equivalent width: EW) が 4000 eV にも達するほど強い。これは、重元素の存在比に換算すると、太陽組成の 3 倍

に相当する。polar の典型的な値は太陽の 0.5 – 1 倍程度であるので、これはとても非現実的な値といえる。

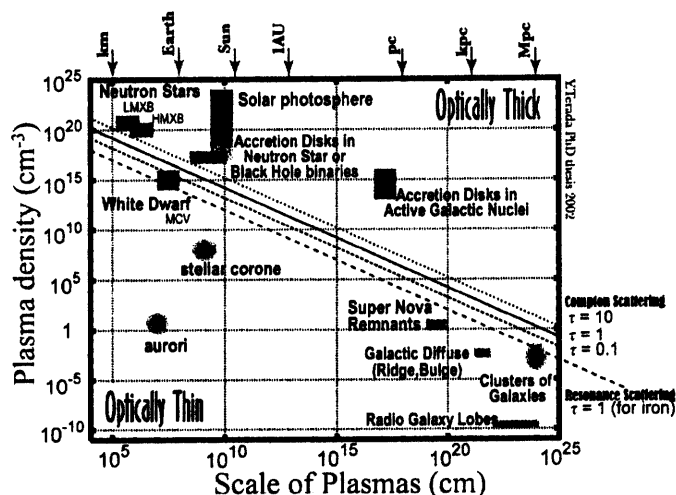


図 1: 宇宙におけるプラズマの大きさと密度。Compton 散乱に対する光学的厚みが 0.1, 1, 10 となる境界、および、太陽素成比を仮定した場合の鉄輝線の共鳴散乱に対する光学的厚みが 1 となる境界も示す。

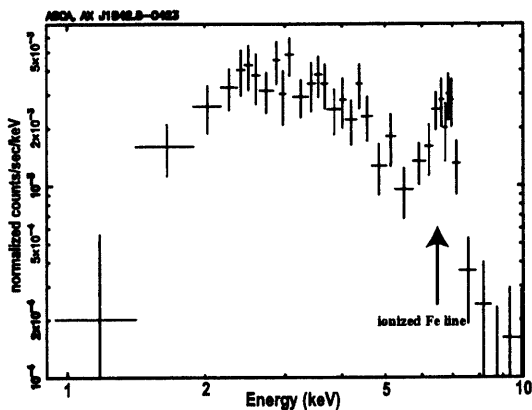


図 2: AX J1842-0423 の「あすか」による X 線スペクトル。ただし、縦軸は検出器の応答を除いていない。光学的に薄い熱的な放射で説明できる連続成分に加え、6.6 – 7.0 keV 付近に、高電離した鉄からの K_{α} 輝線が見える。

我々は、POLE に見られる強力な輝線の源は、重元素比が高いといった各々の天体の個性にあるのではなく、polar 一般に生じる普遍的な物理過程によるものだと考えた。POLE に特有の性質として、常に降着円筒の真上から観測される幾何学的な配置を持つ点に注目し、「ある機構で輝線がその方向に強調され、見掛け上 EW が大きく観測されたに過ぎない」という仮説を立てた。そこで、輝線の光子のみに働く素過程として共鳴散乱に着目し、次の二つの効果が生じる可能性を新しく提案した。その一つは、幾何学的な効果で、光学的に厚い共鳴線で見ると円筒の表面付近しか観測されないため、円筒がコインのように平坦な形状をもつと、真上から見たとき、輝線が強くなると期待される。しかし、この機構では、角度で平均した強度に対し、輝線の強度を高々 2 倍までしか強めることができないため、さらなる機構が必要とされる。それが、ドップラーシフトをもたらす速度勾配の方向に共鳴散乱の断面積が小さくなるという物理的な効果である。模式的に図 3 に示すように、降着円筒は上下方向に強い速度勾配があるため、共鳴光子が縦方向に進むと、ドップラー効果により共鳴条件から外れ、逃げやすくなるはずである。我々は、この二種の効果を相乗することで、共鳴光子が縦方向にコリメートされると考えた。

このアイデアを検証するため、本論文では、降着円筒における共鳴光子の伝搬をモンテカルロシミュレーションを用いて計算し、定量的に共鳴光子の異方性を評価した。典型的な場合、図 4 に示すように、He-like な鉄の K_{α} 共鳴線の強度は、円筒の真上の方向では、角度平均した値に対し 2 – 3 倍まで増加する事がわかった。H-like 鉄 K_{α} 線に対しても同様の結果が得られている。これらの値は、POLE にみられた輝線の強度を説明するのに十分な値である。

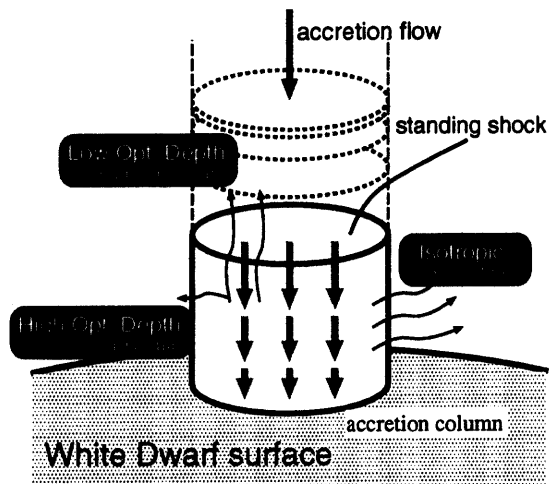


図 3: 降着円筒の模式図。連続 X 線は等方的に放射される一方で、光学的に厚い共鳴線は、円筒の形状と、ドップラー効果をもたらすプラズマ流の速度勾配とによって異方性をもった放射となる。

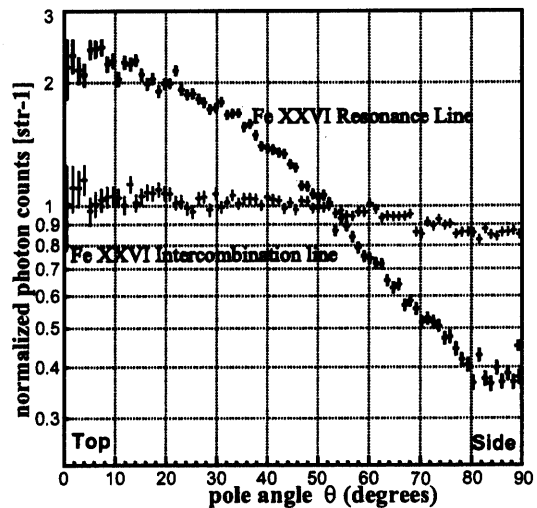


図 4: 降着円筒における鉄輝線の放射伝搬の計算結果。ショック直後の温度 16 keV、密度 $7.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、速度 $9 \times 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ として、縦の勾配は Aizu 解を採用し、He-like な鉄 K_{α} 線の共鳴線および異重項間遷移線の角度分布を計算した。真上が $\theta = 0^\circ$ に相当する。

実験的に共鳴線の異方性を検証するために、「あすか」、*RXTE*、*BeppoSAX* 衛星を用いて、X 線での分光観測を行った。polar は、その自転周期に応じて降着円筒を見込む角度が変化することを利用して、輝線の等価幅の変動を調べたところ、V834 Centauri および、AM Herculis という二つの polar において、鉄の K_{α} 輝線の等価幅が、降着円筒を上から観測するフェーズで有意に強くなっている事が分かった。前者のスペクトルの変化を図 5 に示す。He-like な鉄輝線が $1.9^{+1.0}_{-0.7}$ 倍、変動している。さらに、「あすか」と *BeppoSAX* 衛星で複数の polar を観測したところ、He-like な鉄の K_{α} 輝線の等価幅が、降着円筒を上から覗く場合に強くなっている結果を得た。個々の結果は統計的に有意でないものの、9 天体の全体として 90 % の有意度で 1.8 ± 0.7 倍の変動が検出された。

これらの結果は、X線領域で、観測的に共鳴散乱の効果を示した最初の例となる。また、この異方的な放射機構により、POLEからの強力な輝線の強度も、他の polar と矛盾なく理解することが出来る。さらに、本論文では、共鳴線の異方性を利用して、polar の降着円筒のプラズマ物理量や形状を一意に決定する新しい手法も紹介する。これは、次世代の X 線衛星 *ASTRO-E II* の観測でより有効なプラズマ診断法となるはずである。

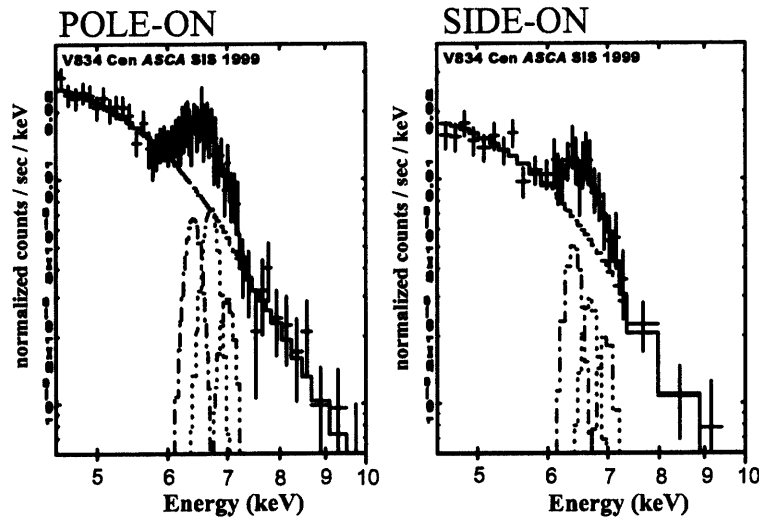


図 5: Polar, V834 Centauri の「あすか」による X 線スペクトル。降着円筒を真上から覗いたフェーズ (左) と、横から覗いたフェーズ (右) を示す。低エネルギー側から順に、中性の鉄の蛍光線 (6.4 keV)、He-like に電離した鉄イオンの輝線 (6.7 keV)、H-like な鉄の輝線 (6.9 keV) が見える。He-like な輝線が有意に変動している。

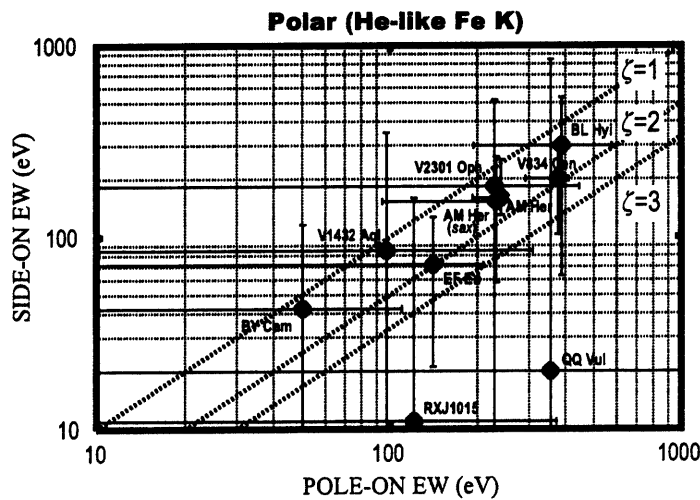


図 6: 「あすか」と *BeppoSAX* 衛星による観測で得た polar の鉄 K_{α} 輝線の等価幅を、降着円筒を横から観測した場合 (縦軸) と上から観測した場合 (横軸) とで比較した図。前者に比べ後者が 1.5 - 2 倍になっている。