

X線精密観測で明らかになったペルセウス座 銀河団中心部の共鳴散乱



佐藤 浩 介

〈埼玉大学理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255〉

e-mail: kksato@phy.saitama-u.ac.jp

ASTRO-H (Hitomi) 衛星搭載の軟X線分光器SXSにより、He-likeにまで高階電離した鉄輝線の微細構造を初めて観測できるようになった。ペルセウス座銀河団中心部ではHe-likeに電離した鉄の共鳴線の光学的厚さが1を超えており、共鳴散乱が起きていると考えられてきたが、SXS以前のX線検出器では共鳴線だけを分離することができず存在を確認することは困難であった。Hitomi/SXSはHe- α 鉄の共鳴線と禁制線を初めて分離し、その強度比は光学的に薄いプラズマモデルから明らかにずれていることを発見した。これらが本当に共鳴散乱によるものなのか、また共鳴散乱によって銀河団パラメータにどのように影響するのかを紹介する。

1. 銀河団ガスからのX線と共鳴散乱

銀河団を満たす 10^7 - 10^8 Kの高温ガスは熱制動放射によりX線を放射しており、エネルギースペクトル中で連続成分として観測される。また高温ガスには元素が豊富に含まれており、高階電離したイオンからの特性X線(輝線)から元素量を測定することができる。一般的にこれらは光学的に薄く、高温ガスとイオンからのX線放射は自身に対して透明である、つまり我々観測者にはまっすぐに届く。一方で、Gilfanovら¹⁾は高階電離した元素からの共鳴線は、強度が強い場合には光学的厚さが大きくなり、共鳴散乱することを示した。もし共鳴散乱が起こっているとすると、イオンはある特定のエネルギーの光子を吸収してすぐにランダムな方向に同じエネルギーの光子を再放射することになる。したがって、ある特定のイオンの共鳴線の強度は共鳴散乱によって歪められているため、共鳴散乱を起こしているイオンの元素アバundanceを調べる観測者は注意が必要である。共鳴散乱の起こりやすさは、ある遷移状態をもつイ

オンの光学的厚さで決まり、その光学的厚さはイオンの振動子強度とそのガスの温度でのイオンの存在確率に依存する。例えば、ペルセウス座銀河団の中心部では、He-likeに高階電離したFe XXV He- α 中での共鳴線の光学的厚さは禁制線の値より約3桁(後述の乱流がゼロの場合)大きくなる^{2),3)}。よって、共鳴線と禁制線を分離しその比を比較することが最も直接的な共鳴散乱の存在の証明となる。1990年代からX線撮像観測の主流であったX線CCD検出器では分光能力が足りずFe XXV He- α 輝線群を分離できなかったが、Hitomi搭載のX線マイクロカロリメータ検出器SXSは軌道上でも非常に高いエネルギー分光能力(5 eV at 6 keV)を実現し、初めて共鳴線と禁制線を分離することができるようになった⁴⁾(図1上)。ただし、気をつけないといけないことがある。一連のHitomi論文でも報告されている高温ガスの乱流だ⁵⁾。高温ガスの乱流によるドップラーシフトによって輝線の幅が広がると、光学的厚さが小さくなるのである。つまり、共鳴散乱の強度と乱流速度はお互い相互依存にあって、両方を満足するよ

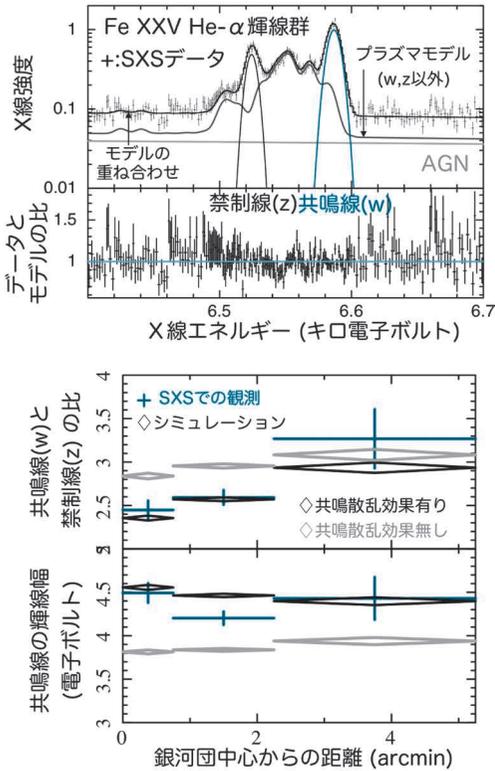


図1 (上図) Hitomi/SXSで観測されたペルセウス座銀河団中心部のFe XXV He- α 輝線群まわりのエネルギースペクトル。(下図) 銀河団中心部からの距離に対するFe XXV He- α 共鳴線 (w) と禁制線 (z) の強度比 (上) と共鳴線 (w) の輝線幅 (下) の半径分布。十字がHitomi/SXSによる観測結果。濃/薄のダイヤモンドが150 km sec⁻¹の乱流が有/無の時のシミュレーション予測。

うな解釈が高温ガスの力学状態を知るには必須なのである。今回のHitomi/SXSの観測の場合、X線のエネルギースペクトルの解析の過程を考えると乱流測定の方が直接的であるが、観測された(共鳴散乱を受けている)共鳴線と禁制線の強度比からも予想される乱流分布を制限することができる。

SXSで観測されたFe XXV He- α の共鳴線 (w) と禁制線 (z) の強度比 w/z は明らかに典型的な

光学的に薄いプラズマモデル^{*1}で予測されるよりも小さかった。加えて、共鳴線の輝線幅のみが他の輝線の線幅に比べて少し大きいという事実が観測された。しかし、共鳴散乱によって w が小さくなっているのか、はたまた他のプロセスで z が相対的になっているのかを確かめる必要がある。そこで我々はモンテカルロシミュレーションを用い、ペルセウス座銀河団の温度、密度、アバンドランスの3次元半径分布を仮定して共鳴散乱の強度を計算した。そしてシミュレートされた光子リストにHitomi/SXSの応答関数をかけ実際の観測を模擬した。SXSで共鳴線を除く輝線の線幅から測定された視線方向の乱流速度⁶⁾を用いると、共鳴散乱のシミュレーションと観測結果の w/z 比は非常によく一致した(例として図1下の上段)。本論文²⁾ではいくつかの乱流分布での w/z 比の変化についても議論しているのでご覧いただきたい。ここで注意しなければいけないことは、銀河団静止系と観測者静止系を考慮して光子とイオンの共鳴散乱の反応過程を考えなければいけないことである。これを考慮しないと、共鳴線だけに観測された輝線幅の広がりを再現できない。一方で共鳴散乱の有無によって禁制線の輝線幅に変化はなく、シミュレーションの値と観測値もよく一致した(図1下の下段)。よって我々は、この w/z 輝線強度比と共鳴線だけの輝線幅の広がりの両方を同時に説明するためには、銀河団中心部での共鳴散乱が必要である、と結論づけた。もちろん不定性も検討されるべきで、我々は本論文²⁾の中でプラズマモデル、電荷交換反応による不定性⁵⁾なども議論している。詳細は本論文を参照されたい。

Hitomi搭載SXSによるX線精密分光によって、初めて銀河団での「マイクロ」な高温ガスの構造を調べることが可能となった。今後、輝線の微細構造をも分離できる将来のカロリメータ搭載衛星計画によって、銀河団内外の高温ガスの情報や、ひ

*1 ここではAPECモデルを使用: <http://www.atomdb.org>

いてはそれらをも取り巻く中高温銀河間物質の観測から宇宙の力学的/化学的進化の解明が進むことに期待したい。

謝 辞

本稿の内容はPASJのHitomi特集号に掲載された“Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS”論文に基づくものです。論文の共同責任著者であるI. Zhuravleva, F. Paerels博士らに感謝致します。シミュレーション部分では、当時東京理科大学の大学院生であった古川愛生氏、広島大学の野雅功助教の大きな貢献がありました。また、Hitomi衛星のサイエンスワーキンググループやハードウェア、ソフトウェアの開発に携わった方々にも心から感謝致します。

参考文献

- 1) Gilfanov, M. R., et al., 1987, Soviet, Astron. Lett., 13, 3
- 2) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 10
- 3) Zhuravleva, I., et al., 2013, MNRAS, 435, 3111
- 4) Hitomi Collaboration, 2016, Nature, 535, 117
- 5) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 12
- 6) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 9

Resonant scattering in the Perseus cluster core with high-resolution X-ray spectroscopy

Kosuke SATO

Department of physics, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 338-8570, Japan

Abstract: The ASTRO-H (Hitomi) SXS first allows us to investigate fine structures of emission lines such as Fe XXV He- α in higher energy band. Particularly in the Perseus cluster core, the resonant scattering should be taken into account when inferring physical properties because the optical depth of Fe XXV He- α resonant line is expected to be larger than 1. The observed line flux ratio of Fe XXV He- α resonant to forbidden lines is found to be lower than the predicted ratio from the Atomic code for typical optically thin plasma.