

「ひとみ」によるダークマター X線の探査



田村 隆 幸

〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 〒229-8510 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: tamura.takayuki@jaxa.jp

ダークマター候補のいくつかは、X線に崩壊する可能性がある。2014年に、複数の銀河団のX線観測から3.5 keV付近に原子起源では説明が難しい「未同定」X線輝線が報告された。「ひとみ」チームは、この信号を過去最高のエネルギー分解能で探した。信号は検出されず、過去の解析に疑問を投げかけた。将来衛星を用いたより深い観測でダークマターを探したい。

1. ダークマターからのX線輝線

「暖かい」ダークマターの候補粒子のいくつかは、光子に崩壊しX線輝線を出す可能性がある。例えば、右巻きニュートリノがその候補である。これらの粒子は相互作用が非常に弱く、地上での検出は困難を極める。そのため唯一の探査方法が宇宙のダークマターからの放射である。2014年に、二つのグループが独立に銀河団や銀河から、XMM-Newton衛星（以下XMM）などを用いて原子起源では説明ができないX線輝線をほぼ同じエネルギー（約3.5 keV）に検出した^{1),2)}。これらが右巻きニュートリノからのX線である可能性が話題になった。しかし、我々の「すざく」を用いた観測では、信号は見つからなかった^{3),4)}。検出されたとされる信号の等価幅は1 eV程度とこれまでの検出器のエネルギー分解能の数%程度であり、検出器の系統誤差（典型的に10%）に比べて弱い。一方、「ひとみ」カロリメータ（SXS）のエネルギー分解能は5 eVとCCDに比べ約20倍高まることにより、検出の感度が飛躍的に高まる。

2. 2016年：打ち上げと解析キャンプ

2月17日に「ひとみ」を打ち上げ、装置の調整と並行して、最初のX線天体としてペルセウス座

銀河団（以下ペルセウス）を2月24日から3月7日にかけて4回に分けて観測した。

日米の主要メンバーなどが内之浦で衛星立ち上げに取り組んだ。私も運用当番として参加した。ここで、まだ誰も見た事のない世界最高性能のX線スペクトルを見ることができた。ほとんどの人は最も明るい鉄輝線に注目していたが、私は画面を横から覗き、もしかしたら、3.5 keV輝線が見えたらどうしようかと考えていた。

データの処理とソフトウェアの準備が進み、3月半ばにはデータ解析が可能になった。初期の解析結果は4月にNatureに投稿され、7月に出版された。次の解析として、ダークマターX線探査が提案された。そこで、6月にアメリカのメリーランド大学で「解析キャンプ」が開かれ、日本から一戸悠人、野田博文、井上翔太、田村隆幸が、アメリカやフランスからも各種の専門を持ったひとみチームのメンバーが、十数人参加した。同じ部屋で議論をし、何度も「同じ釜の飯」を食べ、限られた人しか見る事のできないデータをじっくり眺め、共同で真実を明らかにするという科学の楽しみを味わった。解析の結果は7月にApJ Letterに投稿され、2017年2月に受理された⁵⁾。

3. 結果, 議論と今後の展望

解析の結果をまとめる。「ひとみ」の観測では、3.5 keV 信号を検出しなかった。過去のXMMによる観測のエネルギーの不定性を考えると、今回の解析で99%以上の有意度でXMMの検出強度を棄却した(図1)。エネルギー分解能の差を考えると、「ひとみ」とXMM間の3.5 keV 信号強度についての不一致は、XMMの系統誤差が原因と考えられる。「ひとみ」によるダークマター崩壊率の制限はこれまでの値より強くはない。これは、ペルセウスの強い(プラズマ)X線強度、短い観測時間、小さな有効面積と視野角に起因する。今回の測定は、狭い幅の輝線に対してカロリメータはCCDに比べ非常に感度が高いことを実証した。ダークマターがメンバー銀河と同程度の速度を持つ場合には、幅の広い輝線($\sim 1000 \text{ km s}^{-1} \sim 35 \text{ eV}$)が予想され、感度の向上は小さい。

また3.5 keV 輝線の起源として、エネルギーの近いKあるいはAr輝線が異常に強くなっている可能性が提案されていた。今回の観測は、これらの可能性も棄却した。「ひとみ」のスペクトルには、Sの高階遷移に対応するエネルギー(3.4 keV)で輝線のヒントが見つかった(1.5σ)。この放射の起源として、Guら⁶⁾は、分子ガスと銀河団プラズマの間の電荷交換反応の可能性を議論している。

このような解析に続き、2–12 keVという広いエネルギー帯域での探査を行った。既知のプラズマ輝線以外に有意な信号が検出されなかった⁷⁾。

現在、XRISM衛星の開発が進められている。この主検出器となるカロリメータを用いて、いろいろな天体からの未同定輝線X線を探査できる。「ひとみ」でも検出できなかった暗いダークマターX線を探すには、新しい戦略が有効である。プラズマ放射は弱く十分なダークマターを持つ天体、例えば、X線の中心集中の少ない銀河団、あるいはダークマターの速度(輝線)幅が銀河団より小さい天の川銀河や矮小銀河を長時間観測したい。XRISMによる観測が進めば、多数の天体の重ね合わせ解析など

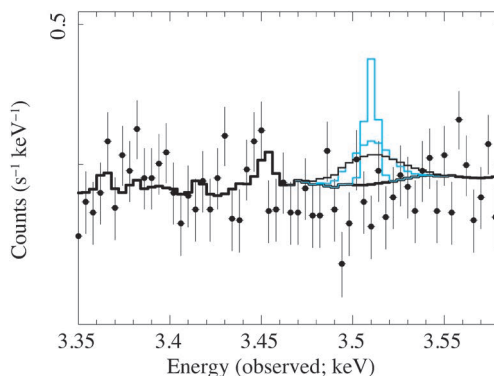


図1 「ひとみ」によるペルセウスの3.5 keV 付近のスペクトル。黒のヒストグラムは、最適プラズマモデル。3.51 keV 付近の輝線は、過去の観測による検出強度を速度幅 (km s^{-1}) 200 (黒)、1000と1500 (シアン) によるモデル。

の新しい手法も可能になる。いずれにしても、ダークマター起源の信号をプラズマ起源のものから分解し、そのエネルギーと速度幅を同定するには、カロリメータのエネルギー分解能が不可欠である。

謝辞

ここで紹介した研究成果を作り出した「ひとみ」チームメンバーに感謝します。

参考文献

- 1) Bulbul, E., et al., 2014, ApJ, 789, 13
- 2) Boyarsky, A., et al., 2014, Phys. Rev. Lett., 113, 251301
- 3) Tamura, T., et al., 2015, PASJ, 67, 23
- 4) Sekiya, N., et al., 2016, PASJ, 68, S31
- 5) Aharonian, F. A., et al. 2017, ApJ, 837, L15
- 6) Gu, L., et al., 2015, A&A, 584, L11
- 7) Tamura et al., 2019, in press (doi:10.1093/pasj/psz023)

Dark matter X-ray hunt with Hitomi Takayuki TAMURA

ISAS, JAXA 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: We used *Hitomi* high-resolution X-ray spectra in a search for unidentified line emission at 3.5 keV and other energies. A number of lines from cluster plasma are resolved for the first time, but with a lack of any unidentified signals including the 3.5 keV one.