観測と衛星搭載装置開発の二刀流で切り込む 活動銀河核セントラルエンジン



野田博文

〈大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉 e-mail: noda@ess.sci.osaka-u.ac.jp

活動銀河核の強大な放射の根源である「セントラルエンジン」は、超巨大ブラックホール周辺の コロナと降着円盤から構成されると考えられますが、基本的な理解が未だに確立されていません. 私は、X線の強度変動に着目した解析で軟X線超過の起源を明らかにするとともに、短時間でタイ プをI型とII型で変える活動銀河核において降着流の状態遷移を発見し、セントラルエンジンの描 像に迫りました.並行して、X線天文衛星ASTRO-H搭載のX線マイクロカロリメータや硬X線/ 軟ガンマ線の検出器、XRISM搭載のX線CCDカメラの開発に貢献してきました.本稿では、これ まで進めてきた活動銀河核の観測的研究や衛星搭載装置の開発、そしてXRISMを用いた研究の展 望についてご紹介します.

1. はじめに

活動銀河核(Active Galactic Nuclei; AGN)は, 母銀河を超える光度で明るく輝き、その放射は電 波からガンマ線まで多波長にわたります. そし て. この強大な放射は、超巨大ブラックホール (Super-Massive Black Hole; SMBH) に降着する 物質の重力エネルギーが効率よく変換されたもの と考えられています. このエネルギー変換を担う 現場、いわばAGNの「セントラルエンジン」は、 質量降着による SMBH の進化,ジェットや円盤 風の生成過程,放射や噴出流による銀河・銀河団 へのフィードバックなど,天文学の様々な重要課 題に直結する極めて重要な存在と言えます. しか し、見かけのサイズが非常に小さいことや、周辺 の物質による複雑な吸収・散乱などが原因とな り,幾何構造や物理状態,質量降着率に伴う変化 をはじめとする基本的な描像が確立されていませ んでした. さらに、「広輝線領域」や「ダスト

トーラス」といったセントラルエンジンに質量を 供給する役割を果たす,より外側の領域との繋が りもよくわかっていません.私はこれまで, SMBH近傍からのX線をはじめとする多波長の 放射を調べることで,セントラルエンジンの観測 的研究を進めてきました.また並行して,そこへ の質量供給源を探るための有効な手段となる精密 X線分光を実現するため,X線天文学の旗艦ミッ ションであるASTRO-H衛星やXRISM衛星に搭 載する観測装置の開発に貢献してきました.本稿 では,AGNセントラルエンジンに切り込むため に,観測と衛星搭載装置開発の「二刀流」で進め てきた研究の中で,研究奨励賞の対象となった内 容を中心にご紹介します.

2. AGNセントラルエンジンの新描像

セントラルエンジンの従来の描像

AGNからは一般に、~1 keV未満から数百 keV の広帯域にわたる連続X線が観測され、その主要

パートは単一のべき型成分で表せることが知られ ています(図1上).これは、「降着円盤」の多温 度黒体放射で生じる紫外・可視光が、SMBH 近傍 に形成された高温電子雲「コロナ」で逆コンプト ン散乱を受けて生じると考えられています (e.g., [1]). このことから、セントラルエンジンが降着 円盤とコロナで構成されることはこれまでにも広 く受け入れられてきました. 高エネルギーカット オフとべきから電子温度や光学的厚みが制限さ れ、電子温度が数百keVで光学的厚みが~1の「高 温コロナ」が存在すると考えられるため、以降、 この逆コンプトン散乱成分を「高温コンプトン (Hot Compton; HC)」と呼ぶことにします. AGN のX線スペクトルにはHCだけでは説明できない 構造も観測され、主要なものとしては数十keVの 「硬X線ハンプ」(図1上)があります.これは、



図1 「すざく」による典型的なI型AGN Markarian 509の観測結果([2]より,一部改変).(上)X線 スペクトル(黒)に,時間変動解析で得られた 変動成分(灰色)と不変成分(青)を重ねたもの.点線は,高温コンプトン,細いFe-Kα輝線, 反射成分(灰色),および暖かいコンプトン(青) のモデル.(左下)0.5-3 keVおよび3-10 keVの ライトカーブ.(右下)3-10 keVと0.8-1 keVの 間のカウントーカウントプロット.

HCが降着円盤,広輝線領域,ダストトーラスな どの物質で光電吸収およびコンプトン散乱される ことで生じる反射成分と考えられます.光電吸収 によって,反射成分の7.1 keVにはFe-K吸収端が 現れ,6.4 keVに「細いFe-Ka輝線(速度幅~ 2000 km/s)」(図1上)が一般に観測されます.

上記の構造に加えて、Tanaka et al. (1995) [3] は、X線天文衛星「あすか」で観測されたセイ ファート銀河 MCG-6-30-15のX線スペクトルの 6.4 keV 周辺に、SMBH による極端に強い相対論 的効果を受けて広げられた Fe-Kα輝線で再現でき る構造を報告しました。報告された相対論的効果 が実現されるためには、SMBHは高速回転(ス ピンパラメータ $a^* > 0.9$; e.g., [4]) のカーブラッ クホールであり, 降着円盤の内縁が最内殻安定円 軌道(Innermost Stable Circular Orbit; ISCO)ま で伸び、HCを生成する高温コロナはSMBHの極 域に点源状に存在する、いわゆる「ランプポス ト | 型 [5] であると論じられました. これ以降, 多くのAGNのX線スペクトルに同様の構造が報 告され、セントラルエンジンは、ISCOまで伸び る降着円盤とSMBH極域にランプポスト型高温 コロナが存在する描像が多くの研究で仮定されて きました(図2右上).しかし、結果は採用する モデルに強く依存し, HCのべきが異なったり [6], HCに部分的な吸収が働くと[7], 極端に強 い相対論的効果は不要になるという反論も数多く 報告されました.この場合,高温コロナがランプ ポスト型である必要も無くなります.また、恒星 質量ブラックホールでHCが観測される「ハード 状態」では、ISCOより遠方で円盤が途切れ、内 側に高温コロナが広がる描像が広く受け入れられ ており[8], AGNにおける仮定と大きく異なる点 も問題でした. 我々は、このランプポスト型高温 コロナの仮定に疑問を抱き,X線スペクトルだけ に注目するのではなく,X線強度の時間変動や多 波長との繋がりという新しい視点を取り入れるこ とでセントラルエンジンの描像に迫りました.

研究奨励賞 ◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆



図2 本研究で得たAGNセントラルエンジンの新たな描像(左).細いFe-Kα輝線と反射成分は省いた.エディント ン比が~1%よりも大きい時は,SMBH側から高温コロナ,暖かいコロナ,降着円盤で構成されるソフト状態 となり,エディントン比が~1%よりも小さくなると,暖かいコロナと降着円盤の一部が高温コロナへと蒸発 し,ハード状態に遷移する[16].従来仮定されてきたSMBH極域の単一のランプポスト型高温コロナの描像 (右上)を覆したとともに,質量が~7桁も異なる恒星質量ブラックホールの状態遷移(右下はCygnus X-1の X線スペクトル;[17]より,一部改変)との統一的理解に繋がる結果となった.

時間変動解析で迫る軟X線超過の起源

AGNの統一モデル[9]では、可視光スペクトル 中に速度幅が~2000 km/s以上の広輝線が観測さ れるとⅠ型に, 観測されないとⅡ型に分類されま す(Fe-Kα輝線は、相対論的効果を受けた輝線と 区別するため、~2000 km/sの速度幅のものを 「細いFe-Kα輝線」と呼ぶ一方,可視光では同程 度の速度幅のものを「広輝線」と呼ぶことに注 意). X線帯域に目を向けると、一般に、I型 AGNでは吸収が弱く、II型AGNでは吸収が強く 働きます.吸収の弱いI型AGNのX線スペクト ルには、硬X線ハンプや細いFe-Ka輝線に加え、 ~1 keV 未満の軟X線帯域において低エネルギー 側に向けて駆け上がっていく連続スペクトル構造 「軟X線超過」(図1上)が一般に観測されます. これを説明するため、(1) HCが電離ガスに部分 的に吸収された結果生じるとするモデル[10]. (2) 降着円盤がISCOまで伸び、内縁部で生成さ

れた軟X線帯域の複数の輝線が(Fe-Kα輝線と同 様に)極端に強い相対論的効果で広げられて繋 がった結果,連続スペクトル状になるモデル [11],(3) HCを放射するコロナとは異なる電子 温度と光学的厚みを持つ別のコロナからの逆コン プトン成分とするモデル[12]の3つが提案されて いました. Tanaka et al. (1995)[3]によって相対 論的に広げられた Fe-Kα輝線で再現される構造が 報告されて以降, ISCOまで伸びる降着円盤と SMBH極域のランプポスト型高温コロナの仮定 が主流となっていたため,軟X線超過もモデル (2)を仮定する研究が広く進められていました.

我々は、X線天文衛星「すざく」を用いてX線 で明るいI型AGNであるMarkarian 509を観測し たところ、典型的な軟X線超過を示すスペクトル とともに激しい強度変動を検出し(図1左下)、こ の強度変動を利用して軟X線超過の起源に迫れな いかと考えました.そこで、図1(右下)のよう

に異なるエネルギー帯域のカウントレートが非常 に良い相関を示し,これを線形回帰すると,傾き が「変動成分」を、切片が観測中にほとんど変動 しない「不変成分」を示す点に着目しました. 横 軸を変動性が激しいエネルギー帯域(図1右下で は3-10 keV)のカウントレートに固定し、縦軸を 様々なエネルギー帯域のカウントレートにとり, 傾きと切片を求めた上でそれらをスペクトルに変 換したところ,傾きから得られた変動成分(図1 上; 灰色データ点)は, HC(図1上; 灰色点線) の一部として再現できることが分かりました. 一 方,切片から得られた不変成分(図1上; 青デー タ点)は、低エネルギー側に向けて駆け上がる形 を持ち、まさに軟X線超過の原因となる成分とし て分解することに成功しました. 注目すべきは, これが不変成分として得られた点です.軟X線超 過は、モデル(1)ではHCそのもの、モデル(2) では(極めて特殊な幾何構造を仮定しない限り) 短時間でHCに追従する反射成分となるため、変 動成分に含まれなければなりません.したがって、 不変成分として得られたことで、モデル(3)の別 の逆コンプトン成分の可能性が高いことが分かり ました. さらに、不変成分のスペクトル形は、電 子温度~0.1 keV. 光学的厚み~20の逆コンプト ン成分としてよく再現され、光学的に厚い「暖か いコロナ | の存在を示します [13]. この手法を「す ざく」で観測された様々なタイプのAGNのX線 データに系統的に適用したところ、吸収の強弱や ジェットの有無に依らずに,暖かいコロナによる 逆コンプトン成分が存在することが明らかになり ました [14]. 以降, これを「暖かいコンプトン (Warm Compton; WC)」と呼ぶことにします. このように時間変動解析とスペクトル解析を組み 合わせた新しい解析手法により、セントラルエン ジンには一般に、高温コロナと暖かいコロナが共 存する描像が見えてきました. 単一のランプポス ト型高温コロナを仮定してきた従来の描像とは異 なる結果が得られたわけです.

第116巻 第12号

Changing-Look AGNで発見した状態遷移

次に、質量降着率の変化に伴い、セントラルエ ンジンにどんな変化が生じるかに着目しました. その頃、数ヶ月から数年という極めて短期間に可 視光広輝線が出現/消失してタイプをI型とⅡ型 の間で変化させ、同時に光度も桁で変化させる 「Changing-Look AGN (CLAGN)」が注目を集め ていました (e.g., [15]). AGNの統一モデル[9] に よるとI型とII型に構造の違いはなく、広輝線領 域がダストトーラスに隠されなければI型に、隠 されればII型になるというのが従来の理解でした. これほどの短時間で視線方向が変化することはな いため、CLAGNは、従来の統一モデルでは説明 できないことになります. すぐに考えつくのは遮 蔽体が視線方向を横切り,一時的に広輝線領域を 隠すモデルですが、CLAGNの中には、このモデ ルでは変動タイムスケールや多波長のスペクトル 変化が説明できないものが多数存在しました. こ のようなCLAGNでは、質量降着率が桁で変化し、 それに伴ってセントラルエンジンが何らかの変化 を起こし、可視光広輝線を生成する広輝線領域に 影響を与えた可能性が高いことになります.

我々は、2008年から2016年にかけて質量降着 率が桁で減少した可能性が高い Markarian 1018 というCLAGNに着目し,X線,紫外線,可視光 の同時観測データを,系統的に調べてみることに しました. その結果, エディントン光度の~8% の光度だった2008年には、典型的なI型AGNの X線スペクトル同様, HCに加えてWCが顕著に 見られ、紫外・可視光帯域には、降着円盤の黒体 放射も見られました(図2左の黒色).しかし、 質量降着率が減少するにつれ、全体として暗くな るだけでなく、WCがHCと比較して著しく減少 し、エディントン光度の~0.6%の光度となった 2016年には、降着円盤放射の一部とHCのみが 残るスペクトルに遷移したことが分かりました ([16]; 図2左の灰色). この変化は、恒星質量ブ ラックホールがたびたび見せる,降着円盤の内縁

研究奨励賞 ◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

部がコロナへと蒸発する幾何構造の変化に伴うソ フト状態からハード状態への「状態遷移」([8, 17];図2右下)とよく似ています.さらに興味 深いことに,セントラルエンジンの状態遷移のポ イントはエディントン光度の~1%であり,恒星 質量ブラックホールの状態遷移のものと一致して います.広輝線領域の電離や励起に寄与するUV から軟X線帯域の大半をWCが担うため,状態遷 移によってWCが消えたことに伴い,広輝線も弱 まった結果,AGNのタイプに変化が生じ, CLAGNになったと考えられます[16].

ここまでの結果をまとめると、AGNのセント ラルエンジンは、エディントン比が~1%よりも 高い場合には、SMBHに近い側から、高温コロ ナ、暖かいコロナ、降着円盤の順に存在するソフ ト状態となり(図2左上)、エディントン比が ~1%を切ると、暖かいコロナと降着円盤の一部 が高温コロナへと蒸発し、高温コロナが卓越する ハード状態(図2左下)に状態遷移することが見 えてきました.特にハード状態においては、高温 コロナはこれまで仮定されてきた点源状ではな く、広がりを持つことが強く期待されます.現 に、我々が別のCLAGNのハード状態において 行ったX線と可視光の1年間にわたる同時モニタ 観測でも、高温コロナの数百シュバルツシルト半 径の広がりを支持する結果が得られました [18]. このように、本研究によって、ランプポスト型高 温コロナが単一で存在するという従来の仮定を覆 すことができ、なおかつ、質量が~7桁も異なる SMBHと恒星質量ブラックホールの統一的な理 解に向けた AGN セントラルエンジンの新しい描 像を得ることができました。

X線天文衛星ASTRO-H搭載装置 の開発

前章のように,セントラルエンジンの構造や質量 降着率に伴う変化が見えつつありますが,その質 量降着率を支配するのは,そこに質量を供給する 広輝線領域やダストトーラスなどの領域です.逆 に,円盤風が発生すると,質量が持ち去られること になります.また,CLAGNのようにセントラルエ ンジンが変化した時,周辺の物質分布にどんな影 響を及ぼすのかも重要な課題です.これらの広輝 線領域,円盤風,ダストトーラスといった領域を探 るには,セントラルエンジンからの放射がこれらの 領域と相互作用して生じる輝線/吸収線を調べる のが有効な方法の一つであり,ラインプロファイ ル,エネルギーシフト,強度を精密に測定すること



図3 X線天文衛星ASTRO-Hに搭載された装置(左; [20]より)と, H-IIAロケット30号機による打ち上げの様子(右).

ができれば、物質分布や物理状態などを詳細に調 べることができます. そこで私は, 従来のX線観測 でよく用いられてきたX線CCDカメラよりも桁で 高いエネルギー分解能を実現する「X線マイクロカ ロリメータ」を搭載し、同時に0.3-600 keV という 広帯域を高感度でカバーできる日本の6番目のX線 天文衛星ASTRO-H(「ひとみ」; [19, 20])の開発 に貢献してきました. ASTRO-Hには4つの検出器 が搭載され、そのうちの2つが0.3-12 keVの軟X 線帯域を分光撮像するための「X線マイクロカロリ $\varkappa - \varkappa$ (Soft X-ray Spectrometer; SXS) [21] $ert \ \varkappa$ 「X線CCDカメラ(Soft X-ray Imager: SXI)[22]」, 残りの2つが5-80 keVの硬X線を捉える「硬X線 撮像検出器(Hard X-ray Imager; HXI) [23]」およ び60-600 keVをカバーする「軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector; SGD) [24]」でした(図 3左).

硬X線撮像検出器と軟ガンマ線検出器の熱設計

私は2009年4月に東京大学牧島中澤研究室(当時)に大学院生として入学してから,HXIとSGD の「熱設計」を主導しました.地上では,効率的 な熱の輸送方法として大気による対流が働くた め,発熱部を冷却したい場合,例えば,パソコン のCPUでは,ファンなどを用いることで効果的に 冷却できます.しかし,衛星軌道上では大気がな いため,基本的に熱伝導と熱放射のみでセンサー を許容温度に安定に制御する必要が出てきます. そのため,地上の検出器とは異なる熱設計が必要 となり,重要な開発要素の一つとなります.

HXIやSGDでは硬X線を検出するために半導 体検出器を5層(HXI)または40層(SGD)に わたり積層し,発熱体となる集積回路がセンサー の直近に複数設置された構造となっていました. さらに,HXIもSGDも衛星構体の外部に設置さ れ,太陽光や地球赤外光,アルベド光が外部から 入射し,それらが衛星の位置や姿勢によって刻々 と変化する過酷な熱環境に曝される状況でした. その中でセンサー温度を許容範囲に安定に維持す るため,我々は,薄い形状でも熱伝導で効果的に 熱輸送できるグラファイトシートなどの熱部材を 上手く活用し,外部熱入力を極力抑えるサン シェードなども新たに取り入れました.そして, 検出器の熱数学モデルを構築し,熱解析で軌道上 における各部の温度を見積もるとともに,検出器 の熱的ダミーを製作して真空実験で検証しまし た.私が大学院を修了する時には,衛星軌道上で HXIとSGDともに各部を許容温度に保つ熱設計 が確立できました[25].

X線マイクロカロリメータ開発への貢献

2014年4月に理化学研究所の玉川高エネルギー 宇宙物理研究室に基礎科学特別研究員として着任 する際,熱設計の経験を活かそうと考え,熱制御 が鍵となるX線マイクロカロリメータ (SXS) の 開発に参入しました. SXSは、複数のシールドで 構成されたデュワー, 二段スターリング冷凍機, ジュールトムソン冷凍機,多段式の断熱消磁冷凍 機、そして液体ヘリウムの蒸発を上手く組み合わ せた冷却システムを用いることで、センサーを衛 星軌道上で極低温(50 mK)に安定に維持します [21]. この状態でX線光子がセンサーに入射する と、光子のエネルギーで温度が上昇するため、こ の温度上昇を高い精度で測ることで、光子のエネ ルギーを精密に測定できます. この原理によっ て、6 keV帯域で7 eV(目標5 eV)と、従来よく 使用されてきたX線CCDカメラよりも20倍から 30倍も高いエネルギー分解能を実現します. 私 は、SXS開発において、検出器単体および衛星搭 載状態での試験に全面的に貢献するとともに, 図4(左)のデュワー内部の伝導と放射による熱 輸送、各部への熱負荷、冷凍機とヘリウム蒸発に よる冷却などを考慮した熱数学モデルによって検 出器内部の熱流や温度分布を詳細に割り出す熱解 析をリードしました. ここでは, ASTRO-Hの打 ち上げ成功に関わった結果を一つ取り上げます.

冷却で重要な役割を果たすヘリウムですが,軌 道上の無重力下で,液体をタンク内に保持し,気



図4 (左) X線天文衛星ASTRO-H搭載X線マイクロカロリメータ(SXS)の構造([26]より).(右)ASTRO-H打ち 上げ時のSXS各部の温度を初期条件として,熱解析で予測した打ち上げ後の軌道上温度の推移(黒).軌道上で実 測した温度(青)と重ねて示しており,精度よく温度を予測できていたことがわかる([26]より,一部改変).

体のみを排出する必要があります. この相分離の ために多孔質の枠が設置されており、 超流動状態 の液体ヘリウムが示す熱機械効果(超流動成分が 温度の低い方から高い方へ向かって流れる性質) を利用して、液体をタンク内に留め、気体のみを 宇宙空間に放出します[27]. これが上手く機能し 続けるには、液体ヘリウムが常に超流動状態(温 度2.17 K未満)でなくてはなりません。 ヘリウム の排気と冷凍機の運転を継続していれば、ヘリウ ム温度が2.17 Kを上回ることはありませんが、AS-TRO-Hをロケットで軌道に投入する際、地上で両 方とも一旦停止し, 打ち上げ後に軌道上で再開す る必要がありました.この間,液体ヘリウム温度 はどんどん上昇していくため、仮に想定していな い事象が発生したとしても, 軌道上で超流動状態 が破れないためには、打ち上げ時にどのくらいの ヘリウム温度まで許容できるかが極めて重要な問 題でした.考えられるケースを全て地上で試験す るのは困難なため、熱解析で迫ることにしました. 私は、JAXA筑波宇宙センターでの冷却試験に貢 献しながら,そのデータを用いて熱数学モデルの 改良と較正を重ね, 冷凍機運転の開始のタイミン グが遅れるケースや、冷凍機のパワーが通常より 低いケースなど、 軌道上で考えられる様々な状況 を想定した熱解析を実施しました.その結果,打 ち上げ時の液体ヘリウム温度が1.7 K未満であれ ば,常に超流動状態に安全に保たれることを明ら かにしました.この結果は,実際にASTRO-Hを 軌道上に投入したH-IIAロケット30号機の打ち上 げにGOを下す条件の一つにも採用され,打ち上 げ成功に欠かせない研究となりました[26].

ASTRO-Hの打ち上げと成果

2015年後半, ASTRO-HはJAXA種子島宇宙セ ンターに輸送され、2016年に入ると、私は、打 ち上げに向けた種子島でのSXSの射場運用に全 面的に参加しました. 数週間におよぶ射場での慎 重な検出器運用の結果,液体ヘリウム温度は~ 1.5 Kを達成し、打ち上げ条件を満たしたことを 確認しました.そして,2016年2月17日17時45 分 (IST). ASTRO-Hを搭載した H-IIA ロケット 30号機が打ち上げられました(図3右).開発に 力を注いできた衛星の打ち上げは、私にとって ASTRO-Hが初であり、これまでの人生の中で、 最も忘れることのできない,感動的な出来事の一 つとなりました. 打ち上げ後, 軌道上で無事にへ リウムの排気を開始し、 冷凍機も問題なく立ち上 がりました.そして、SXSを軌道上で稼働するこ とに成功しました. 打ち上げ直後の射場にて, 打

ち上げ時のSXS各部の実測温度を初期条件とし て,熱解析によって軌道上の温度推移を予測して みました.図4(右)に示すように,熱解析の結 果は実際の温度推移を精度よく予測できており, 地上実験で改良と較正を重ねてきた熱数学モデル が,内部の熱流や温度分布を高い精度で再現でき ていたことが示されました[26].

ASTRO-Hは,全天で最もX線で明るい銀河団 として知られるペルセウス座銀河団の中心部の観 測に成功し,SXSによって高温プラズマからのX 線を精密分光することに成功しました.これまで にない高いエネルギー分解能のおかげで,ガスの 速度構造,温度構造,重元素組成比などが高い精 度で明らかになりました.また,ペルセウス座銀 河団のほかにも,超新星残骸N132DやG21.5-0.9,大質量X線連星IGR J16318-4848,単独中性子 星 RX J1856.5-3754,そしてかに星雲を観測し, それぞれ論文も出版されています.これらの研究 成果は,天文月報2019年5月号から6月号にわた る ASTRO-H (「ひとみ」)特集にて詳しい内容が 紹介されているため,これらをご参照ください.

本格観測に向けての準備が進んでいた2016年 3月26日、大変残念なことに、姿勢系のトラブル が原因でASTRO-Hからの通信が途絶え、その後 1ヵ月あまりで運用が終了されることとなりまし た.私は、2016年4月1日に東北大学学際科学フ ロンティア研究所/天文学教室に着任し,新天地 にて、ASTRO-Hを駆使してAGN研究を飛躍させ てやろうと意気込んでいたところだったので、事 故の直後はとても落胆しました. しかし, ペルセ ウス座銀河団の中心にはNGC 1275と呼ばれる AGNが存在し、ASTRO-Hの観測データにそこか らの信号が含まれていましたので、その解析に力 を尽くしました. SXSの高いエネルギー分解能の おかげで、AGNからの細いFe-Ka輝線は、等価幅 ~10 eV と微弱であったにもかかわらず,有意に検 出することに成功しました.そして、速度幅を 500-1600 km/sと過去最高の精度で決定すること

ができ,NGC 1275の細いFe-Kα輝線の起源やダ ストトーラスの構造について,これまでにない知 見が得られ,X線マイクロカロリメータを用いた 史上初のAGN観測となりました[28].こちらにつ いても,詳しくは天文月報2019年6月に記事[29] をまとめていますので,ご参照ください.

X線天文衛星 XRISM に向けた装 置開発と展望

X線CCDカメラの開発への貢献

ASTRO-Hの事故の後,後継機としてX線撮像 分光衛星XRISM [30]がプロジェクトとして立ち 上げられ,ASTRO-Hに搭載された4つの検出器 のうち,X線マイクロカロリメータとX線CCD カメラの2つが搭載されることになりました.X 線望遠鏡(X-ray Mirror Assembly; XMA)と組 み合わせ,X線マイクロカロリメータはResolve, X線CCDカメラはXtendと名づけられました. 私は,2018年まではSXSから引き続きResolveの 開発に参加していましたが,2018年10月に, Xtend開発の主要機関である大阪大学X線天文学 グループに着任し,そこからはX線CCDカメラ の開発に貢献してきました.

Xtend は、0.4-13 keV において、Resolve の視 野である3分角四方を含む38分角四方の広視野 を一度にカバーします.その検出器であるX線 CCD カメラは、ASTRO-Hに搭載されたSXI [22] のデザインを踏襲しつつも、CCD素子に可視・ 赤外光の遮光性能の向上や、電荷転送経路への ノッチの導入などの複数の改善が施されました. 我々は、衛星に搭載する候補となるCCD素子に、 0.4-13 keV の範囲の単色X線や可視・赤外光を照 射し、分光性能、電荷転送効率、軟X線感度、遮 光性能などの主要な性能を測定するためのシステ ムを大阪大学に立ち上げました(図5).このシ ステムを用いて、候補素子の性能を系統的に測定 し、性能が高い四素子を衛星搭載素子として選定 し、それらに対して地上キャリブレーションのた



図5 大阪大学に立ち上げたX線天文衛星XRISM搭 載用X線CCDの測定システムでの実験の様子. 写真の人物は著者.

めの長時間データを取得しました.その後は、こ れらの素子を衛星搭載品の検出器構体、エレキ基 板、冷凍機などと組み合わせた検出器全体での性 能評価試験を主導しました.

2021年2月に行った試験の際, 突如として, CCD素子の撮像領域外で起源が分からない電荷が 生じ, 撮像領域に侵入するという, これまでに経 験したことがない事象が発生しました. これが軌 道上で起こり,何も対策しない場合,撮像分光性 能に深刻な影響が及び得ます。我々は即座に、衛 星搭載素子を別の候補素子と入れ替え、地上キャ リブレーションのための長期データ取得をやり直 しました. さらに、大阪大学に構築したシステム を駆使して、撮像領域外からの電荷侵入を防ぐた めの新しいCCD駆動方法を開発しました. これに より、万が一軌道上でこの事象が発生したとして も要求を満たす性能を実現できる方法が確立でき ました, 並行して, 電荷発生原因の究明実験も進 めてきました. これらのおかげで、素子を入れ替 えた後,電荷侵入事象は発生しておらず, Xtend は衛星に搭載した状態での地上試験において、良 い性能を発揮しています. 衛星全体としての開発 も順調に進み、2023年9月7日8時42分 (JST), XRISMはJAXA種子島宇宙センターからH-IIAロ ケット47号機によって無事に打ち上げられました. ここからは、 軌道上での検出器の立ち上げや運用 を進めいくことになります.引き続き,気を引き 締めて取り組んでいきたいと思います.

精密X線分光によるAGN研究の展望

最近. ALMAやVLTIといったサブミリ波や赤 外線の干渉計によって核周円盤やダストトーラス を直接空間分解する結果(e.g., [31, 32])が報告 されるなど、様々な波長の観測でAGNの理解が 進展しています. その中で,X線観測も極めて有 効な手段であり、特に、分子ガスやダストに限ら ず、全物質を無バイアスに調べられる点が大きな 利点です、これにより、ダストトーラスのさらに 内側の, 広輝線領域, 円盤風, セントラルエンジ ンに至る SMBH の近傍まで見通すことができま す. そして現在. XRISM がもたらす精密X線分 光の時代に向け、様々なサイエンスが検討されて います(詳細はASTRO-HやXRISMのWhite Paper [33, 34, 35] をご参照ください). 私はこれま で、時間変動に着目する研究を進めてきました が、これと精密X線分光を融合させるユニークな 研究を展開したいと考えています. その準備とし て、XRISMによって様々なAGNから捉えられる と期待される、細いFe-Kα輝線の時間変動の研究 を進めてきました. その結果をご紹介します.

我々は、X線天文衛星「すざく」と複数の可視 光地上望遠鏡を組み合わせて、タイプがI型の明 るい状態からII型の暗い状態に遷移した後の CLAGNであるNGC 3516 [36]を一年間にわたり モニタ観測しました.その結果、細いFe-Ka輝線 の有意な強度変動を捉えることに成功しました (図6左).この変動は、連続X線や可視光とよく 連動し、相互相関解析を行ったところ、細い Fe-Ka輝線が連続放射から~10日遅れて追従する ことを発見しました[37].これは、変動する細い Fe-Ka輝線の主な放射源が、SMBHから~10光日 離れた距離に存在することを示します.この距離 は、タイプがI型の際の広輝線領域の位置に相当 し[38]、広輝線が観測されないII型になっても、 元々の広輝線領域の位置に(広輝線を出さない)



図6 (左)タイプがI型からII型に遷移したCLAGNであるNGC 3516を,X線天文衛星「すざく」と地上可視光望 遠鏡で同時モニタ観測して得られた連続X線 (2-10 keV;上図の黒),細いFe-Kα輝線(上図の青),可視光(下 図)のライトカーブ([37]のデータから作成).(右)NGC 3516をXRISMのX線マイクロカロリメータで 100 ks観測した場合のシミュレーションスペクトル(黒).比較のため,従来のX線CCDで得られるスペクト ルのシミュレーション(灰色)をオフセットさせて表示.広輝線領域からの細いFe-Kα輝線を青線,ダスト トーラスからの細いFe-Kα輝線を黒線で示す.

物質が生き残り続けることを示し、広輝線領域の 形成メカニズムに大きく迫ることができました [37]. 今後,視線方向のみではタイプの違いを説 明できないことを示すCLAGNの理解をより深め, AGNの統一モデルをさらに改良していくうえで, 細いFe-Kα輝線の時間変動を捉える方法が極めて 有効であることを実証することができました.

XRISMのX線マイクロカロリメータを使えば、 高いエネルギー分解能によってさらに細かい時間 変動が追えると同時に、図6(右)に示すように、 多くのAGNで広輝線領域からダストトーラスに かけての様々な位置からの細いFe-Kα輝線を成分 ごとに分解でき、それぞれのプロファイルやエネ ルギーシフトを個別に得られるようになります. 連続放射に対する時間遅延を用いて SMBH から の距離を独立に調べれば、SMBH 周辺のどの位 置に、どのくらいの速度のインフローやアウトフ ローが存在するかを,可視光広輝線の有無にかか わらず、網羅的に解明できると期待されます、こ れにより、ダストトーラス、広輝線領域、円盤 風. 降着円盤の繋がりなど、未解明だったAGN の異なる領域間の物質の流れにも迫ることがで き、セントラルエンジン周辺で質量がどう供給/ 放出されるかを知る,これまでにない手がかりが 得られることは間違いないでしょう.

5. さいごに

AGNの観測と衛星搭載装置の開発を二刀流で進 めてきましたが,それぞれに様々な困難があり, 並行して進めることに苦労する場面もありました. しかし,一方の知見がもう一方の研究に活きたり, 両方をやっていないと気づけない新しい発想が生 まれたりと,相乗効果も非常に大きいと感じます. また,サイエンティストが装置を細部にわたり理 解しておくことが,今後の巨大な科学衛星プロ ジェクトを成功させるうえでも重要になってくる と思います.これからも,自分の研究スタイルと してさらに磨いていきたいと思います.

衛星搭載装置の開発では、大変幸運なことに、 ASTRO-HとXRISMに搭載された四種類の異なる X線検出器全ての開発に関わらせていただきまし た.このような経験を持つ方は、過去にもあまりい ないと思います、貴重な機会と経験を与えていた だいたことに心から感謝しております。今後はこの 経験を活かして、まずはXRISMの成功に向けて引 き続き全力で取り組み、さらに将来の天文衛星に

向けて,新しい検出器や観測のアイデアを出し, その実現のために貢献していければと思います.

謝 辞

この度は、2022年度日本天文学会研究奨励賞と いう名誉ある賞をいただき大変光栄に存じます. これまで私の研究を支えていただいたすべての 方々に心から感謝申し上げます. 大学院生時代の 指導教員であり、修了後も大変お世話になってい る牧島一夫先生,研究室の先輩であり様々な相談 にのっていただいている山田真也さん, ブラック ホールやAGNについての議論を頻繁にさせていた だいているイギリスダラム大学の Chris Done さん には、この場をお借りして深く感謝いたします. また、玉川徹さんをはじめ理化学研究所高エネル ギー宇宙物理研究室の皆さん、秋山正幸さんをは じめ東北大学天文学教室/学際科学フロンティア 研究所の皆さん、松本浩典さんをはじめ大阪大学 宇宙地球科学専攻の皆さんには、これまで様々な 場面でサポートしていただきました. まことにあ りがとうございました. さらに, ASTRO-H開発で はHXI&SGDチームならびにSXSチームの皆さん、 XRISM 開発では Xtend チームの皆さんにも、大変 お世話になりました. ここに一名一名のお名前を 記載できない点が心苦しいですが、この場をお借 りして御礼申し上げます. 最後に、本稿の編集を 担当していただいた勝田哲さん, AGNの共同研究 者であり、本稿に多くのコメントをいただいた 川室太希さんに厚く感謝いたします.

参考文献

- [1] Haardt, F., & Maraschi, L., 1993, ApJ, 413, 507
- [2] 野田博文, 2013, 博士論文, (東京大学)
- [3] Tanaka, Y., et al., 1995, Nature, 375, 659
- [4] Dabrowski, Y., et al., 1997, MNRAS, 288, L11
- [5] Matt, G., et al., 1991, A&A, 247, 25
- [6] Noda, H., et al., 2011, PASJ, 63, 449
- [7] Miller, L., et al., 2008, A&A, 483, 437
- [8] Done, C., Gierliński, M., & Kubota, A., 2007, A&ARv, 15, 1

- [9] Antonucci, R., 1993, ARA&A, 31, 473
- [10] Gierlinski, M., & Done, C., 2004, MNRAS, 349 L, 7
- [11] Ross, R. R., & Fabian, A. C., 2005, MNRAS, 358, 211
- [12] Magdziarz, P., et al., 1998, MNRAS, 301, 179
- [13] Noda, H., et al., 2011, PASJ, 63S, 925
- [14] Noda, H., et al., 2013, PASJ, 64, 4
- [15] Macleod, C. L., et al., 2016, MNRAS, 457, 389
- [16] Noda, H., & Done, C., 2018, MNRAS, 480. 3898
- [17] Yamada, S., et al., 2013, PASJ, 65, 80
- [18] Noda, H., et al., 2016, ApJ, 828, 78
- [19] Takahashi, T., et al., 2018, JATIS, 4, 021402
- [20] 大橋隆哉,高橋忠幸,2019,天文月報,112,274
- [21] 藤本龍一, 2019, 天文月報, 112, 452
- [22] 林田清, 2019, 天文月報, 112, 456
- [23] 中澤知洋, 萩野浩一, 2019, 天文月報, 112, 471
- [24] 渡辺伸, 2019, 天文月報, 112, 474
- [25] Noda, H., et al., 2014, SPIE, 9144, 91445E
- [26] Noda, H., et al., 2018, JATIS, 4, 011202
- [27] Ezoe, Y., et al., 2018, JATIS, 4, 011203
- [28] Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 13
- [29] 野田博文, 2019, 天文月報, 112, 353
- [30] Tashiro, M., et al., 2018, SPIE, 10699, 1069922
- [31] Garcia-Burillo, S., et al., 2014, A&A, 567A, 125
- [32] Gámez Rosas, V., et al., 2022, Nature, 602, 403
- [33] Reynolds, C., et al., 2014, arXiv1412.1177
- [34] Kaastra, J. S., et al., 2014, arXiv1412.1171
- [35] XRISM Science Team, 2020, arXiv2003.04692
- [36] Shapovalova, A. I., et al., 2019, MNRAS, 485, 4790
- [37] Noda, H., et al., 2023, ApJ, 943, 63
- [38] Denney, K. D., et al., 2010, ApJ, 721, 715

Studies of the AGN Central Engine with Observations and Development of X-ray Instruments Onboard Satellites

Hirofumi Noda

Osaka University, 1–1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560–0043, Japan

Abstract: Although the central engine is the origin of powerful radiation from an active galactic nucleus (AGN), even its fundamental properties (e.g., geometrical structure) are not well constrained. We perform X-ray and multi-wavelength observations of AGNs and study the nature of the central engine with a particular focus on time variability. In parallel, I contribute to development of X-ray instruments onboard astronomical satellites ASTRO-H and XRISM to realize unprecedented spectral resolution for AGNs. In this article, I introduce the observational studies and the development to establish the picture of the AGN central engine.