

# 「すざく」衛星で見たブラックホールと X 線望遠鏡開発

國枝秀世 名古屋大学 〒464-8602 名古屋市千種区不老町  
 小賀坂康志 名古屋大学 〒464-8602 名古屋市千種区不老町

**要旨** X線による天体観測は、宇宙の高エネルギーで、激しい現象を我々に見せてくれます。2005年に打上げたすざくが明らかにしてきたテーマの中から、ブラックホール、中でも、銀河の中心核に潜む、大質量ブラックホールについて、ここでは取り上げようと思います。最初は、私達の住む銀河の中心核ブラックホールの歴史を、X線観測で遡るお話です。二番目の話題は、いくつかの活動的な銀河核の大質量ブラックホールのX線観測から、ブラックホールの持つ、強い重力場が直接検証された話です。しかも、場合によると、ブラックホールのスピンまでも決められるかもしれません。第三の話題は、こうしたブラックホールの進化をたどるため、更に透過力の高い、硬X線観測が重要であり、硬X線撮像望遠鏡を開発していることです。開発した硬X線望遠鏡は、SPring-8を使用して特性を測定した上で、気球に搭載して天体観測を行っています。これらの較正実験等でご協力頂いている、放射光学会の関係者の皆様に、私達が何を観測しようとしているか、お伝えできればと思って、本稿をまとめました。

## 1. はじめに

すざく衛星は、日本の5番目のX線天文衛星として、2005年7月10日に、宇宙航空研究開発機構、内之浦実験場から、M-Vロケットで打上げられました。衛星は、打上げの衝撃と振動に耐え、高度約500 kmの軌道に、無事、投入されました。あすか衛星以来、12年半振りとなる打上げ成功を、その準備に汗を流した同僚と共に、喜びました。

人類は永らく可視光だけで宇宙を見つめ、その姿を明らかにして来ました。しかし、その波長域は500 nm付近の数百 nmに限られ、この波長域に放射のピークを持つ、温度にして数千度の恒星がその対象の中心でした。これを制限していたのは、地球の大気であり、短波長側の紫外線、X線、長波長側の赤外線などは直接、地上に達することはありませんでした。しかし、1962年6月、ロケットで大気の外に出て観測すると、X線で明るく輝く星が見つかり、X線天文学が始まりました。その対象の第一は中性子星などの高密度星であり、その究極であるブラックホールでした。極く狭い領域に、多くの質量が詰まったこれらの天体では、強い重力場に流れ込むガスの重力エネルギーがX線となって放射されるため、可視光では気が付かなかった理論上の天体が、X線観測によって、初めて、実証科学の世界にたぐり寄せられることになりました。

本稿では、X線観測の進歩により、次々と明らかになって来た、ブラックホールの姿について述べると共に、その観測を実現した、X線望遠鏡の開発についても触れ、

日頃からその特性試験などでお世話になっている放射光学会の皆様に、その興奮の一端をお伝えしようと思います。

## 2. すざく衛星概要

衛星の概観を Fig. 1 に示します<sup>1)</sup>。全長約6 m、太陽電池パドルを広げた横幅が約5 m。重量1.7トン。あすか衛星など、これまでの衛星にくらべ、4倍重くなっています。Fig. 2には、衛星の断面図と搭載機器の配置が示してあります。衛星の上端には、5台の望遠鏡が、伸展式の光学台に取り付けられています。焦点距離4.5-4.75 mを確保するため、打上げ時にはロケット頭胴部に納まる様に短く、軌道に上がってから伸展機構で長くする工夫をしています。

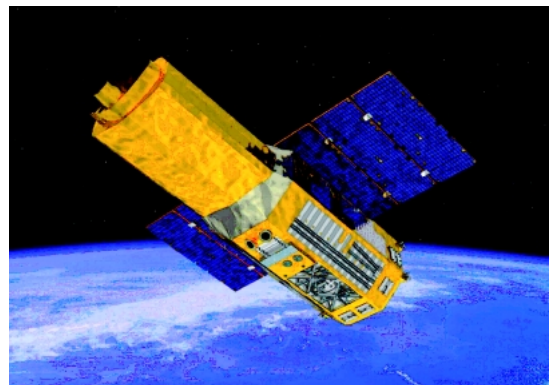


Fig. 1 Schematic view of the Suzaku satellite.

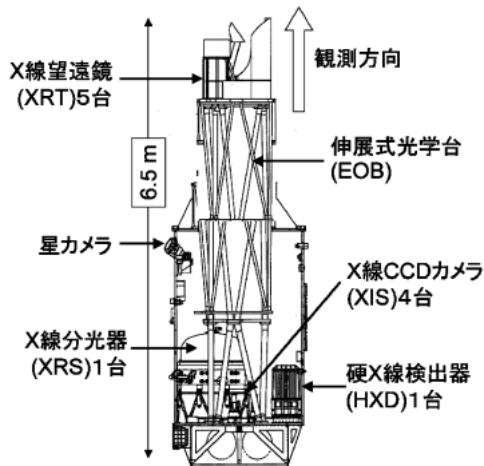


Fig. 2 Cross section of Suzaku with onboard instruments.



Fig. 3 X-ray telescope (XRT) of 40 cm in diameter.

す。基部には、2種類の焦点面検出器、硬X線検出器など観測系と、通信系、電源系などの共通系が搭載されています。X線望遠鏡 (Fig. 3) は、超軽量で有効面積の大きな、多重薄板望遠鏡です。口径40 cmとし、斜入射角が0.2–0.6度の範囲になるよう、設計しています。金を反射面とするため、全反射により、ほぼ10 keVまでの集光結像を実現しています。1台の望遠鏡に反射鏡約1400枚を組込んで、7 keVでも1台あたり、250 cm<sup>2</sup>の有効面積を、重量20 kgで実現しました<sup>2)</sup>。特に、4台合わせた、7–10 keVの有効面積は、これまでで最大のNewton衛星をしるぐ大きな値となっています。

すざく衛星の当初の目玉は、60 mKの極低温に冷却したマイクロカロリメータからなる、高分解能分光器 (XRS<sup>3)</sup>) でした。機械式冷凍機、固体ネオン、液体ヘリウム、断熱消磁冷凍機を組み合わせ、これまでの衛星で最も低い温度を、軌道上で実現しました。6×6のアレイ式のカロリメータでは、6 keVで7 eVと言う、驚異的な分解能を、打上げ後、実際に得る事に成功しました。しかし、液体ヘリウムが、急激に失われ、実際の観測に入る直前に、使用不能になってしまいました。そこで、他の4台のCCDカメラ (XIS<sup>4)</sup>) と、硬X線検出器 (HXD<sup>5)</sup>)

を中心にした、観測計画に急遽、変更し、現在まで観測を続けています。私は、Project Scientistとして、こうした観測のとりまとめ役を務めて来ましたが、限られた境界条件の中で、如何に科学的成果を出すか、時間との闘いでした。

今回のX線望遠鏡 (XRT) と CCDカメラの組み合わせた観測システムの中では、裏面照射型の CCDの導入がポイントです。もともと、前回のあすか衛星で、世界で初めて導入したX線望遠鏡と CCDカメラの組み合わせで、私達は、天体のX線像と詳細なスペクトルを同時に得ることができ、X線天文学を大きく進めることができました。特に、後述する、鉄輝線のスペクトル撮像観測が重要です。今回はそれに加え、裏面照射型の CCDを4台中1台搭載する事で、1 keV以下の軟X線の感度を大きく高めることになりました。また、CCDを改良し、CCDピクセル間の電荷受け渡しによる電荷損失のために劣化していた、波長分解能を向上させることができました。

すざく衛星では、10 keV以下の軟X線の撮像観測と共に、10–300 keVの硬X線領域で、高い感度を目指す、硬X線検出器を搭載しました。この波長域では光子数がエネルギーのべき型関数で減少するため、検出器に周囲から漏れ込んで来る、バックグラウンドを如何に減らすかが、感度を決めます。深い井戸型をしたアクティブシールドと細いコリメータを併用する事で、バックグラウンドを、これまでの衛星で最も小さくすることができました。XISと同じ方向を観測する、このHXDを組み合わせる事により、すざく衛星では、0.2–300 keVまでの広い波長域を高感度でカバーすることができました。

すざく衛星の観測的特徴をまとめると次のようになります。

(1) 10 keVまでの軟X線で最大級の面積：これにより、6–7 keVにある鉄輝線のスペクトルの撮像観測が大きく進められます。星の内部の核融合による元素合成の終着駅である鉄は、宇宙で極めて重要な元素であり、これを用いて、天体の進化をたどることが重要です。同時に、ブラックホール近傍からの鉄輝線スペクトルの形を詳しく調べることで、放射体の運動、重力の効果を明らかにできました。

(2) 1 keV以下の軟X線の分光：これにより、裏面照射型 CCDで、炭素、窒素、酸素の特性X線の分光観測が可能になります。超新星が爆発した後に広がる高温ガス (超新星残骸) などの観測では、爆発を起こした天体内部の核融合の産物を、スペクトル的に、また空間的に見分けることになります。例えば、窒素が少なく炭素が卓越していれば、星の内部で、3 $\alpha$ 反応 (<sup>4</sup>Heが3個くっついて、<sup>12</sup>Cが作られる) が主流となる、重い天体が想定されます。また、超新星爆発時に、異なる元素が固まりになって飛び散る様子が、見えて来ています<sup>6)</sup>。

(3) 広帯域高感度観測：硬X線検出器と CCDカメラを合わせ、広帯域のスペクトル観測が実現され、観測上、大きな魅力となります。巨大なブラックホールでは、広い波

長域にわたって、放射が出ており、その全容をつかむことで、放射の機構に迫ることができます。同時に、この連続成分を確定することで、初めて、鉄輝線等のスペクトル構造を、ゆるぎないものとして抽出でき、その詳しい議論に入れることができます。

### 3. 我が銀河中心核

本稿では、こうしたすざく衛星の優れた性能を活かした多くの観測トピックスから、ブラックホールに関連した、二つの成果を紹介したいと思います。

宇宙に多数存在する銀河のうち10個に1個くらいの割合で、中心核がその銀河全体の星の明るさよりも明るく輝く銀河が知られています。その多くは X 線でも明るく輝いています。こうした、活発な銀河中心核は、活動的銀河核と呼ばれ、その中心には、太陽質量の100万倍から1億倍の大質量ブラックホールがあります。ブラックホールにガスが流入すると、その重力エネルギーが、放射に変換されて輝いていると考えられています。我が銀河の中心は、その候補として、最も近い天体とすることができます。これまでは、中心核射手座 (Sgr) A\* と呼ばれる領域から直接こうした強い放射は見られていませんが、活発な活動を示す兆候が、様々な波長で知られています。すざく衛星も、この領域を重点的に観測することにしました。

Fig. 4 には、観測された X 線スペクトルを示します。3本の輝線が明確に見られ、それぞれ、電離度の低い鉄による輝線 (6.4 keV)、He 様イオンにまで電離した鉄の輝線 (6.7 keV)、H 様イオンに電離した鉄の輝線 (6.9 keV) に相当します。Fig. 5a は、6.7 keV を含む波長域だけで描いた強度分布を、6.4 keV の帯域で描いた Fig. 5b と共に示してあります<sup>7)</sup>。本来、He 様、H 様イオンは、 $10^7$  K を越す、高温プラズマの中で電離が進むことが知られています。Fig. 5a で明るく見えている領域は、この高温プラズマの存在を表し、銀河中心近傍で、多数発生した、超新星爆発によって、多量の高温ガスが作られたことを示唆します。一方、6.4 keV の輝線は、明るい X 線源によって照射を受けた、周囲の低電離の鉄からの蛍光 X 線と考えられます。例えば、最初に述べた、高密度星やブラックホールのまわりからも、検出されています。Fig. 5a の強度分布は、明らかに Fig. 5b と異なり、放射プロセスの違いが、空間的位置の違いからも見てとることができます。こうした、6.4 keV の分布は、銀河中心近傍のあちこちに見ることができます (Fig. 6)。射手座 B にある分子雲から反射されて来た6.4 keV が、特に強く検出されています。そこでは、点線で描いた分子雲の右下半分だけ輝いており、右下に明るい光源があることを示唆します。もし、右下、350光年離れた、銀河中心が照らしていたとすると、その明るさは、 $10^{41-42}$  erg/sec と推測されます<sup>8)</sup>。この明るさは、太陽の全放射エネルギーの1億倍以上明るく、活動的銀河核と

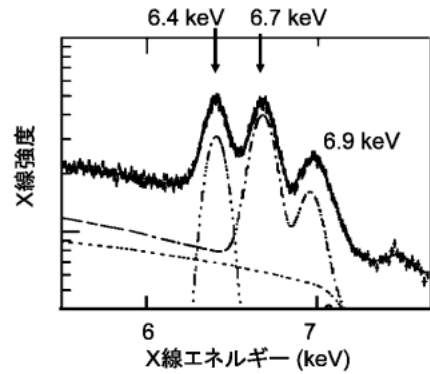


Fig. 4 X-ray spectrum of our Galactic center region. The dot-dashed line corresponds to plasma emission with two lines, the three-dot-dashed line to a power law component and the dashed line to the fluorescence iron line.

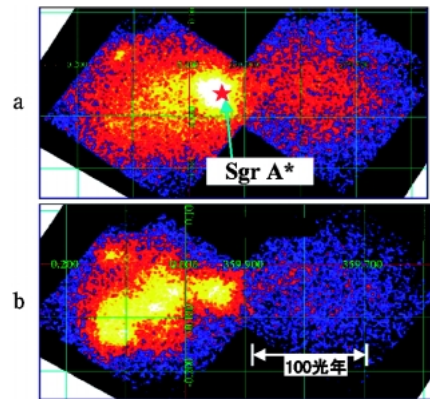


Fig. 5 a: X-ray map of 6.7 keV band around Galactic center. b: X-ray map of 6.4 keV band around Galactic center.

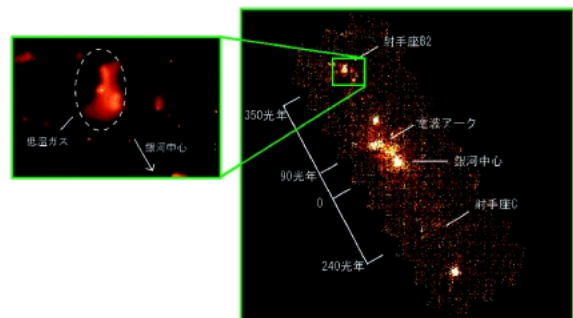


Fig. 6 Broad map of 6.4 keV band around Galactic center.

しては、標準的な明るさです。射手座 B の様に、反射に特徴的な6.4 keV の鉄輝線を放射するガスを、X 線反射雲と呼んでいます。そこで、銀河中心方向の分布図 (Fig. 6) に観測された3ヶ所の反射雲の6.4 keV の X 線強度から銀河中心の明るさに変換してみます。すると、遠方の分子雲ほど光源が明るいことが示唆され、銀河中心からの距離を時間に戻すと、銀河中心の明るさが300年前から徐々に暗くなって行ったことが分かりました。我が銀河中心核に、



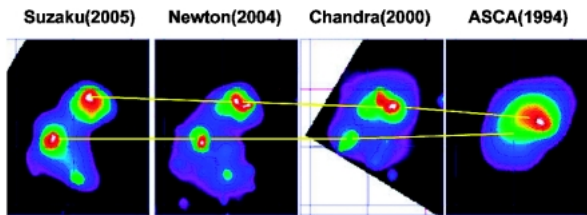


Fig. 7 Time behavior of 6.4 keV map of Sgr B.

大質量ブラックホールがあり、300年前には大量のガスが流れ込んで、明るく輝いていたこと、そして、その後、ガスの流入量の減少とともに、すっかり活動を停止していると考えられています。射手座A\*は、今では、300年前の1万分の1程度にまで暗くなっています。Fig. 7の分布は、射手座BのX線反射雲の、あすか衛星による1994年のデータ、その後のChandra, Newtonそして今回のすざくの結果をまとめたものです<sup>9)</sup>。この10年余りの間に、分子雲を照らすX線の波面が移動して、光っている部分に変化している様に見えます。しかも、6.4 keVの強度が順にずれて行くことから、ガス流入の期間が十年のオーダーと短かったことも推測されます。この現象は、「多くの銀河の中心核には大質量ブラックホールが存在するものの、ガスの供給があるもの、もしくはある時にのみ、活動的銀河核として認識される」と言うアイデアを支持すると言えます。すべての銀河の内、約10%が活動的であると言うことは、大質量ブラックホールが活動性をもつ時間的割合が10%と読み直すこともできます。我々の銀河中心も、近いうちに、ガスの流入を受けて、再び明るく輝くかも知れません。

#### 4. ブラックホールに触れる

銀河中心核にある、大質量ブラックホールからの強いX線放射はこれまでも、様々な系外銀河から良く知られています。ブラックホールの重力圏に取りこまれたガスは、降着円盤を構成し、その中で角運動量を外へ流しつつ、ブラックホールに落ち込んで行きます。流入物質の重力エネルギーが円盤の温度を数千万度に高めたり、高エネルギー粒子の加速に使われます。その結果、降着円盤からの熱的放射と、高エネルギー電子による非熱的放射（逆コンプトン散乱）により、X線が作られると考えられています。Fig. 8に、活動的銀河核の例として、MCG-5-23-16のX線スペクトルを示します。基本は、べき型の放射と、その放射に照らされたガスからの反射光と考えています。Fig. 8の下のパネルには、べき型成分で観測スペクトルを割った値を示しています。10 keV以上の盛り上がりは反射成分です。反射光の中には、強い、鉄輝線が6.4 keVに見えています。前述の我が銀河中心で見られた6.4 keVの輝線です。

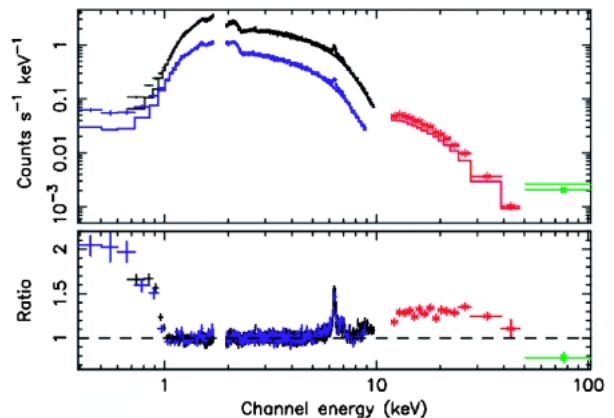


Fig. 8 Broad band X-ray spectrum of active galactic nucleus MCG-5-23-16. Bottom panel shows the residual spectrum after subtraction of the best fit power law.

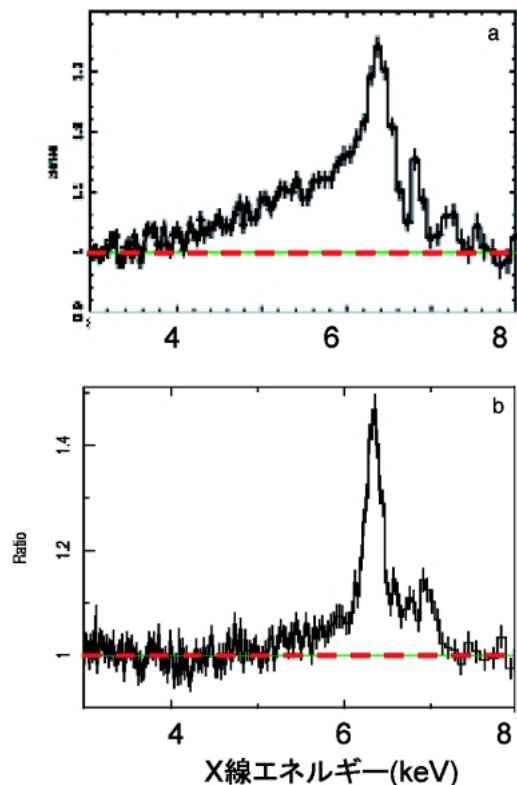


Fig. 9 a: Broad iron line profile from MCG-6-30-15. b: Broad iron line profile from MCG-5-23-16.

この輝線付近を良く拡大してみると、べき型の連続成分の上に乗っている鉄輝線のプロファイルは、Fig. 9aの様に、広がっていることが、すざくのデータで確認されました。この図では、観測スペクトルをべき型スペクトルモデルで割った比が示してあります。本来ならば、検出器の分解能を反映しただけの、狭い輝線として検出されると思っていたところ、広がりを持ち、しかも、低いエネルギー側に裾を持った分布が見えて来ました。この兆候は、あすか衛星によって最初に示唆されました<sup>10)</sup>が、あすか衛星の

データでは、統計的なゆらぎが大きく、広がった分布の存在自体に対する疑いもたれました。すざく衛星は、あすか衛星に比べ、高エネルギー側の面積が大きくなり、Fig. 9a に示す様に、統計の良いデータが得られて来ました。すざく衛星のもう一つの長所は、300 keV まで、高い感度の観測ができることであり、鉄輝線から高いエネルギー側の連続スペクトルを精度良く決める事ができました。これにより、Fig. 9 で見られる輝線スペクトルの形、特に、低エネルギーの裾についても、揺るぎない結果を得る事ができました。

この広がりを説明する最も有力な考えは、ブラックホール近傍の鉄輝線放射体の置かれた環境に注目したものです。まず、Fig. 10 に、活動的銀河核の構造を示す模式図を示します。中心近くに明るい X 線源があり、周囲の物質を照らし、6.4 keV の鉄輝線を作ります。強い放射を受けて、輝線を放射する鉄は、ブラックホールへの降着円盤にあるとすると、その回転速度は、光速に近くなります（脚注 1, 2 参照）。光速に近い速度で、軌道運動をしていれば、そこからの放射には、ドップラー効果が働き波長がシフトします。軌道面内に近い方向から見ると、光速で観測者に近づく軌道と、離れる軌道からの放射が重なるため、二つのピークに分かれた波長プロファイルが予想されます。但し、相対論的な速度で回るため、青い方のピークが強調（ビーミング）されます。

一方、降着円盤の内縁では、ブラックホールの強い重力を受けることが予想されます。その強い重力の中では、時間の進みが遅いため、遠方に到達する光の波長は、発生源での波長より長くなる、重力による赤方偏移が起きます（脚注 3 参照）。先ほどのドップラー効果によるダブルピークに、この重力による赤方偏移が加わると、Fig. 9 に

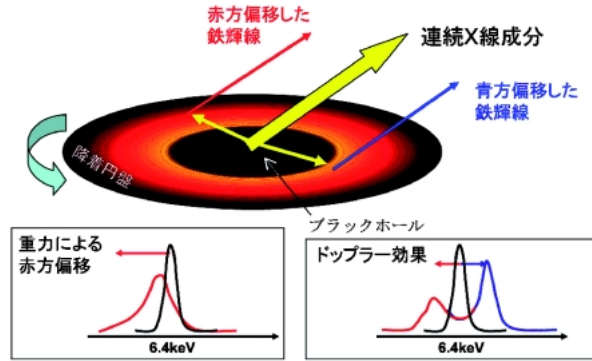


Fig. 10 Schematic view of a black hole.

見られる様なプロファイルが必然的に作られることが予想できます。このモデルを観測スペクトルに当てはめると、私達は円盤の軸から30度くらいの角度から見ており、最内縁の軌道は、ブラックホール半径の3倍よりも内側まで近づいていることが分かって来ました<sup>11)</sup>。円盤は普通（ブラックホールが自転していない場合）、遠心力を加味した、実効重力を計算すると、安定軌道があり得るのは、ブラックホール半径の3倍までと考えられます。もし、ブラックホールが回転していれば、それよりも小さな半径でも安定な軌道があり得ると考えられ、我々の観測は、ブラックホールの自転（スピン）を示す、最初の証拠とすることができます。

この現象については、いくつかの天体で少しずつ異なる形で見えてきており（Fig. 9b）、その境界条件などにバラエティがあることが分かって来ています<sup>12)</sup>。また個々の天体でも時間と共に変化している様にも見られます。これらを通じて、共通の解釈としてこの考えに問題がないか、バックグラウンドの影響で結論が変わらないかどうか、慎重に検証を進めています。

ブラックホールは18世紀に最初のアイディアが出され、20世紀初頭の一般相対論の登場を得て、理論的には確立されました。その実在は、理論的には中性子星として踏みとどまれない様な重い高密度星が、X線星として1970年頃、次々と見つかったことで、間接的に確かめられました。しかし、ブラックホールの強い重力場の手がかりは、あすか衛星の登場する1993年まで待たねばなりません。すざく衛星は、その手がかりを確かな直接証拠とするばかりでなく、ブラックホールのスピンと言う、新たなパラメータを決める手がかりも与えようとしています。ようやく、ブラックホールも実証科学としての組上に上がる時代となりました。

脚注 1 ブラックホールの大きさ：星の質量を  $M$  とする。  $R$  において軌道運動  $v$  をしている時、その脱出速度（重力エネルギー＝運動エネルギー）は、

$$GM/R = v^2/2 \quad G: \text{重力定数}$$

で与えられる。半径が小さな星では、この速度が光速  $c$  になり得る（ミッチェル1783）。この時の半径  $R_s = 2GM/c^2$  をブラックホールの半径と定義し、また、シュワルツシルト半径と呼ぶ。この半径に近づくと、軌道速度は、光速にかなり近づく。

脚注 2 降着円盤：ブラックホールや中性子星に、伴星からガスが流れ込むと、元の天体の角運動量を持っているため、円盤を形成する。ケプラー運動をしていると、軌道速度は半径が小さい、内側程速い。外側の物質と摩擦があると、内側のガスは、角運動量を外に渡して、更に内側の軌道に落ちて行く。これにより、効率良く、ガスは円盤を通して、中心天体に落ちることができる。半径を小さくする（落ちる）時の重力エネルギーを円盤表面から黒体放射するため、内側ほど高い温度となり、紫外線、X線を放射する。

脚注 3 重力による赤方偏移：重力場の中の力学を記述する一般相対論では、自由落下する系が、慣性系と同じ、基準系の役割を果たす。ブラックホール近傍に近づくとその基準系の速度は光速に近づき、遠方から見ると、時間の進みがゆっくりに見える。半径  $R$  にある系から放射される

振動数  $\nu$  の電磁波は、無限遠から見ると、 $(1 - R_s/R)^{1/2}$  だけ低い周波数になる。波長にすると長くなるため、光が赤い方にずれる。これを、重力による赤方偏移と呼ぶ。

## 5. ブラックホールの進化をたどる道— 硬 X 線望遠鏡の開発

宇宙の進化の中で、銀河が生まれ、その中心核に大質量ブラックホールが育まれて来ました。今我々が見ている空では、遠方の銀河は初期の銀河であり、近傍の銀河は、最近の銀河と考えられます。それらの銀河からの X 線放射が重なり合って、全天がほぼ均一に、X 線で明るく輝いています。これを X 線背景放射と呼んでいます。その X 線スペクトルは Fig. 11 に示す様に、40 keV 付近でピークとなります<sup>13)</sup>。一方、前節で見た活動的銀河核の X 線スペクトルは、べき型をしており、10 keV 以下から、緩やかなスロープで10 keV 以上の硬 X 線に伸びて行きます。そのスペクトルの天体を集めても、40 keV のピークは説明できないことが分かっていました。このピークは、多分、Fig. 11 の下に挿入した、強い吸収を受けたブラックホールが多数重なっていると考えられています。一般に硬 X 線では、エネルギーが高いほど、透過力が強く、スペクトルは低いエネルギー側が吸収され、低いエネルギーに向かって、シャープに落ちる形になります。この急なスロープが先ほどのピークを説明します。

これまで私達は、10 keV 以下の軟 X 線望遠鏡により、こうした活動的銀河核を一つ一つ分解して、ほぼ90%の背景放射を説明できるところまで来ました。しかし、10 keV から上の硬 X 線領域では、望遠鏡がなく、背景放射の10%くらいしか、点源として認識できていません。強い吸収を受けた活動的銀河核は、10 keV 以下では見えない天体であり、今、硬 X 線領域で見えている天体の10倍くらいの数のブラックホールが見つかる可能性があります。こうした、吸収に隠れたブラックホールを掘り起こすことで、ようやく、真のブラックホールの進化の道筋が見

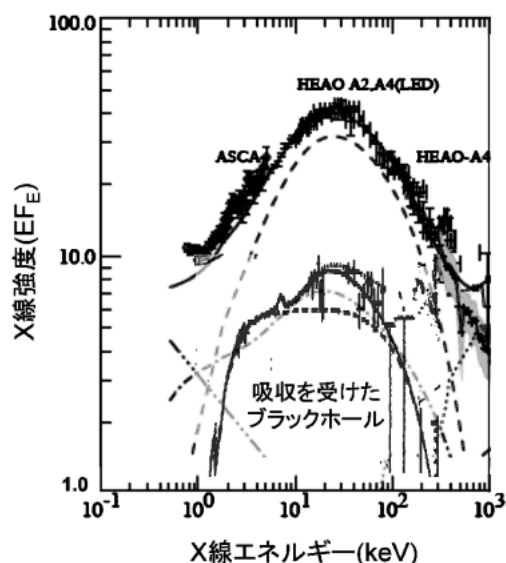


Fig. 11 Broad band spectrum of the Cosmic X-ray Background.

えて来ます。

このためには、硬 X 線望遠鏡を作り、X 線背景放射の主体となる40 keV の天体を一個一個識別して行くことが最も確実なアプローチになります。そこで、私達は、これまで不可能だった硬 X 線反射鏡を開発し、硬 X 線撮像観測を実現することを、すざくの次の目標にしました。この章では硬 X 線望遠鏡の開発について述べます。

これまで金、白金など、重い金属の単層膜を反射面として来た軟 X 線反射鏡の限界を越えるため、私達は、多層膜を導入しました。白金と炭素と言う、密度の大きく違う、数 nm の薄膜を多層、積層することで、反射鏡面に多層膜を形成しました。反射面内に入り込んだ硬 X 線は、多数の界面の反射が強め合って、大きな反射率で反射されます。人工の結晶格子を思い浮かべて頂くと良いと思いますが、このあたりは、放射光関係の読者の皆様は、良くご存知のことと思います。私達は更に、層間隔に変化を持たせる事で、色々な波長の X 線を反射し、広帯域で反射の可能な「スーパーミラー」に発展させました (Fig. 12)。天文学では、実験室実験と異なり、様々な波長域の現象を観測しなければなりません。多層膜光学系をその天文学に応用する上で、スーパーミラーの導入は、大きなブレイクスルーになりました<sup>14)</sup>。

この多層膜スーパーミラーを実際の硬 X 線望遠鏡に完成させるには、幾つかの課題がありました。特に、多層膜を用いても、鏡面から測った斜入射角が0.3度程度であり、有効な集光面積を得るには、多数の反射鏡を Fig. 3 の様に同心円に並べる必要があります。実際には1000枚を越す反射鏡を組込んでいます。当然、厚い鏡面基板を用いると、開口効率が下がります。私達は0.15–0.20 mm のアルミ薄板を基板とし、その上にレプリカ法により多層膜反射鏡を生成しました。滑らかなガラス円筒の表面に多層膜を成膜し、これを接着剤でアルミ基板に写し取る手法です。このレプリカ法により、研磨することなく、多層膜反射鏡を量産することができました。硬 X 線望遠鏡で実際に、隠れたブラックホールを探す試みは、この硬 X 線望遠鏡を気球に搭載して実施することにしました。

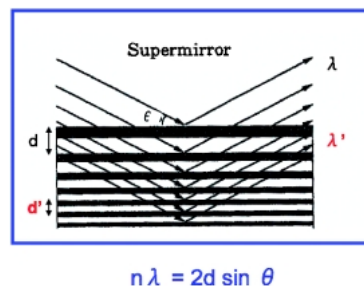


Fig. 12 Structure of the multilayer supermirror.



InFOC $\mu$ S 2001.7, 2004.5, 2004.9  
SUMIT 2006.11

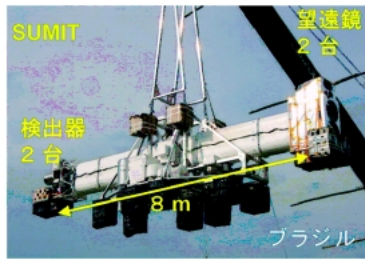


Fig. 13 Balloon borne hard X-ray imaging experiments (InFOC $\mu$ S and SUMIT).

## 6. 硬 X 線撮像気球実験と望遠鏡特性試験

地球を覆う大気は、宇宙から降り注ぐ放射線から、地上の生命を守ってくれる一方、X線で宇宙を見ようとしても、大気の吸収のため、直接、地上から観測ができません。そのため、X線望遠鏡を人工衛星に搭載して、大気を乗り越え、X線天体を観測して来ました。しかし、20 keVを越える硬X線では、大気の透過率も少し良くなり、高度40 kmあたりまで気球で上昇すると、半分くらいの硬X線が透過されて来ます。そのため、私達は、人工衛星に較べると、はるかに手軽に使える、気球実験を行う事にしました。

Fig. 13は、ブラジルで行った気球実験のゴンドラの写真です。長さ8mの鏡筒の右端に望遠鏡が2台、左端に検出器が2台搭載されています。望遠鏡の口径は40 cm、焦点距離は8 mです。白金と炭素を数 nm ずつ、数十層、積層し、最大60 keVまでの反射を実現しました。低いエネルギー側は、高度40 kmの残留大気(地上の1/300程度)の吸収で、25 keVまでに制限されます。焦点面には、硬X線の焦点面像を撮る、撮像検出器を2種類置きました。一つは、位置検出型の光電子増倍管とシンチレータを組み合わせ、位置分解能は約2 mm (1分角相当)を達成しました<sup>15)</sup>。もう一つは、シンチレータを蒸着したCCDカメラです<sup>16)</sup>。こうした気球による硬X線撮像観測<sup>17)</sup>は、これまで、日米協力によるInFOC $\mu$ S実験と、ブラジルとの共同実験SUMIT実験で、合計4回実施し、数個の天体の硬X線像を、世界に先駆け検出して来ました<sup>18)</sup>。これらは、最終的には、日本の次期X線天文衛星NeXTに硬X線望遠鏡を搭載して、広く、深く探査することになると思われます。

こうした硬X線望遠鏡の集光特性を、実際の硬X線で測定することは、大学の研究室では殆ど不可能です。このため、私達は、個々の反射鏡の反射率などは、実験室の小型の装置で測定し、全体の特性は、SPring-8のビーム(BL20B2)を用いて、測定することにしました<sup>19)</sup>。Fig. 14は、実際にSPring-8において、測定中のX線望遠鏡を示

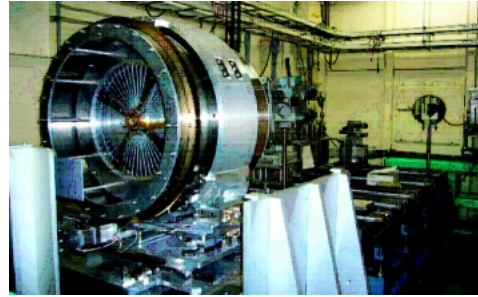


Fig. 14 Hard X-ray balloon borne telescope being measured at SPring-8.

します。放射光が有利な点は、分光器を通した単色光であること、平行度が良いこと、何より、強度が強いことです。そのビームに対し、望遠鏡を2次元(X-Yもしくは、 $r-\theta$ )で移動して、全面を走査します。検出器を同量、同期させて動かせば、無限遠の平行光の像を再現できます。また、部分毎に照射するため、ローカルな問題を弁別することができます。この測定により得られた像を見ながら、反射鏡位置を補正して、結像性能を追い込みます。そして、異なる波長で、望遠鏡全面を走査をすることで、有効面積のエネルギー依存性を調べています。測定結果は、2005年版SPring-8のResearch Frontiersの中の、論文<sup>20)</sup>にもまとめてあります。実際の観測データを正しく理解し、科学的成果、結論を出すには、こうした望遠鏡のX線集光特性を予め測定しておくことは、必須です。今後の硬X線望遠鏡も、この手法により、光学調整、特性測定を進めて行きたいと思っておりますので、ご協力、よろしく御願い致します。この他にも、すざく衛星のフィルターの透過率などの測定にもSPring-8を利用して頂いたことも申し添えさせていただきます。

## 7. おわりに

すざくの観測はまだ始まって2年経っておらず、あすかの8年に較べれば、まだまだこれからです。初期の成果については、日本天文学会欧文報告の特集号(Publication of Astronomical Society of Japan, Vol. SP-1)に30編が投稿されています。本稿もこれらの論文に立脚したものですので、詳しいことはこれらを読んでみて下さい。本当に大きな成果はミッションが始まって、2-3年経ってから生まれてくる場合が多く、我々も深く、広くデータを見て、新たな発見につなげたいと思っています。同時に、すざくの次の世界を拓くための努力もしており、そのためには更に広い分野の皆さんの知恵をお借りしたいと思っています。今後とも、ご協力頂きます様、お願い致します。

## 謝辞

すざく衛星の開発、運用にご協力頂いた、国内外のすざ

くチーム、関係機関のみなさまに心より感謝致します。すざく衛星搭載用 X 線望遠鏡ならびに、気球搭載用硬 X 線望遠鏡の較正および特性試験には、高輝度光科学研究センター JASRI / SPring-8 のビームライン BL20B2 を中心に、課題番号、2004A0009-LM, 2004B2009-LM-np, 2005A3009-LM-np, 2005B-0007, 2006A-0007, 20006B-0007, 20007A1690により使用させて頂きました。特に上杉健太郎博士、鈴木芳生博士には大変お世話になりました。誌面をお借りして、お礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) Mitsuda et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, S1-S7 (2007).
- 2) Serlemitsos et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S9-S21 (2007).
- 3) Kelley et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S77-S112 (2007).
- 4) Koyama et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S23-S33 (2007).
- 5) Takahashi et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S35-S51 (2007).
- 6) Miyata et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S163-S170 (2007).
- 7) Koyama et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S245-S255 (2007).
- 8) Koyama et al.: Publ. Astron. Soc. Japan, 48, 249 (1996).
- 9) Koyama et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S221-S227 (2007).
- 10) Tanaka et al.: Nature Vol. 375, 659-661 (1995).
- 11) Miniutti et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S315-S325 (2007).
- 12) Reeves et al.: Publ. Astron. Soc. Japan 59, pp. S301-S314 (2007).
- 13) Sreekumar et al.: ApJ. 494, 523 (1998).
- 14) Yamashita et al.: Appl. Opt. Vol. 37, No. 34, 8067-8073 (1998).
- 15) Tamura, et al.: Proceedings of SPIE conference, vol. 6266, pp. 62663R (2006).
- 16) Miyata et al.: Proceedings of SPIE conference, vol. 6266, pp. 81M (2006).
- 17) Kunieda: Proceedings of SPIE conference, vol. 6266, pp. 62660B (2006).
- 18) Ogasaka et al.: Proceedings of SPIE conference, vol. 5900, pp. 217-224 (2005).
- 19) Ogasaka, et al.: Proceedings of SPIE conference, vol. 6266, pp. 62663T (2006).
- 20) Ogasaka et al.: SPring-8 Research Frontiers, p. 146 (2005).

### ● 著者紹介 ●



#### 國枝秀世

名古屋大学大学院理学研究科・教授  
E-mail: kunieda@u.phys.nagoya-u.ac.jp  
専門：X 線天文学, X 線光学

#### 【略歴】

1977年、名古屋大学大学院理学研究科修士課程修了。1979年、名古屋大学理学部助手、1993年、同、助教授、1999年、宇宙科学研究所教授を経て、2005年より現職。その間、1986-1988年に米国 NASA ゴダード宇宙飛行センター客員研究員。現在、すざく衛星の Project Scientist として、科学観測運用をとりまとめる。



#### 小賀坂康志

名古屋大学大学院理学研究科・助教  
E-mail: ogasaka@u.phys.nagoya-u.ac.jp  
専門：X 線天文学, X 線光学

#### 【略歴】

1996年学習院大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。博士(理学)取得。1996年より、日本学術振興会海外特別研究員として、NASA Goddard Space Flight Center に2年間滞在。1998年より日本学術振興会特別研究員 (PD) として名古屋大学で研究。2000年4月より現職。



# Black holes observed with Suzaku and developments of hard X-ray telescopes

**Hideyo KUNIEDA** Graduate School of Science Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya City, Aichi 464-8602, Japan

**Yasushi OGASAKA** Graduate School of Science Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya City, Aichi 464-8602, Japan

**Abstract** X-ray observations have been revealing high energy phenomena in the Universe. In this article, we would like to choose themes of massive black holes harbored in active galactic nuclei. The first subject is our Galactic center. Amongst various kinds of its activity, Suzaku observations distinguished the reflection nebulae illuminated by the central black hole, which tell us the history of the black hole activity in these 350 years. The second subject is the iron emission line from accretion disks of massive black holes. The broad line feature is well explained by the relativistic Doppler effect and the gravitational redshifts. The latter is the first direct evidence of the strong gravitational field of black holes. In order to follow the evolution of such massive black holes, we are developing hard X-ray imaging telescopes to search for buried black holes in thick absorption material. Hard X-ray telescopes with multilayers are examined in synchrotron facility (SPring-8) to evaluate their performance, and then they were launched in balloon experiments to observe celestial objects. We hope this article will provide readers with one of science cases we are aiming at with X-ray telescopes.

---