

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19104003

研究課題名（和文） 硬 X 線撮像気球実験による活動銀河・銀河団の研究

研究課題名（英文） Balloon borne hard X-ray imaging observations of active galactic nuclei and cluster of galaxies

研究代表者

國枝 秀世 (KUNIEDA HIDEYO)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00126856

研究成果の概要（和文）：活動銀河・銀河団を気球で硬 X 線撮像観測するため、多層膜スーパーミラー硬 X 線撮像望遠鏡を完成させた。また、昼間の観測時の姿勢を決定する為に、昼間用星カメラを新たに開発し、これらを NASA グループの気球ゴンドラに組み付けた。

研究成果の概要（英文）：A multilayer super mirror hard X-ray telescope was developed for a balloon experiment. It was mounted on a balloon gondola prepared by a NASA group, together with a day time star camera we have developed in this program.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2008年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
2009年度	20,800,000	6,240,000	27,040,000
2010年度	14,900,000	4,470,000	19,370,000
2011年度	17,800,000	5,340,000	2,314,000
総計	81,500,000	24,450,000	105,950,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：X 線、銀河・銀河団、望遠鏡、気球実験

1. 研究開始当初の背景

10 keV 以下の軟 X 線領域では、反射望遠鏡による、天体撮像観測で、X 線天文学は大きく発展した。当グループも、あすか衛星、すざく衛星の軟 X 線望遠鏡を開発し、日本の衛星による望遠鏡観測を実現して来た。X 線天文学の次の展開としては、10 keV 以上の硬 X 線の集光撮像観測と、高分解能分光であった。中でも、硬 X 線撮像観測に必要な、硬 X 線に対する高い反射率を持つ、多層膜スーパーミラーと言う新しい技術が、我々のそれまでの研究により、実現されていた。この多層膜スーパーミラーをアルミ基板にレプリカした反射鏡で、超軽量の硬 X 線望遠鏡を実現し、2001-2006

年にかけて実施した、日米共同気球観測 InFOCuS 実験、日伯共同気球観測 SUMIT 実験に用いた。特に 2004 年の InFOCuS



日米共同気球観測 InFOCuS 計画ゴンドラ (2001.5, 2004.5, 2004.9)

実験では、白鳥座 X-1 を含む、幾つかの天体の硬 X 線像の取得に、世界で始めて成功した。その成果を受けて、日本の次期 X 線天文衛星計画 ASTRO-H では、主観測装置の一つに硬 X 線望遠鏡—撮像検出器を採用する事になった。ただ、その打上は 2014 年と言われ、本計画を提案した時点では、8 年先の計画と想定していた。

2. 研究の目的

(1) 銀河・銀河団の進化

宇宙の進化は、初期の極めて緩やかな量子力学的なゆらぎから、我々の棲む現在の極めて多様で、非一様な世界への、ゆらぎの進化であると言っても良い。1/10000 しかない初期ゆらぎから銀河・銀河団が生まれ、密度の高い部分はますます高く、エネルギーの高い粒子はますます高エネルギーになる。

こうした、非一様、非平衡な極端な例は、 10^{20} eV を越える超高エネルギー粒子の存在である。この様な粒子の加速過程は、ごく少数の粒子にのみエネルギーを集中する、と言う極めて不思議な過程である。しかし、この 10 年の間に、熱的な放射が主体となっていると思われる超新星残骸や、銀河団から、非熱的な放射と思われる、ベキ型のスペクトルを示す硬 X 線成分が見つかり始めた。ベキ型スペクトルとは、ボルツマン分布と異なり、比較的少数だが高いエネルギーを持つ電子が存在していることを示す。銀河団では、20keV 以上で、熱的放射を凌駕するベキ型スペクトルが伸びていることも報告されている。銀河団に持ち込まれたエネルギーが、熱的および非熱的現象にどう分化して行くかは、硬 X 線撮像観測の大きな題目である。

一方、密度の高い極限はブラックホールの形成に至る。銀河の中心核には、太陽の百万倍から一億倍重い、大質量ブラックホールが作られている。銀河の形成と平行して、銀河中心核に大質量ブラックホールが形成される過程は、現在ホットな話題である。宇宙の進化の歴史の中で、こうしたブラックホールが何時、どれくらい作られたかを観測的に探る手がかりは、ブラックホール直近の領域から放射される、X 線波長域の観測でこそ得ることが可能である。その為には、多層膜スーパーミラーの層厚設計法を向上させること、反射鏡基板形状精度向上により、硬 X 線望遠鏡の性能を高める事を第一の目的とした。この望遠鏡を搭載した気球観測実験を日米で実施する事を目指した。

観測対象としては、活動的銀河核と銀河団を想定した。前者では、硬 X 線の背景放射成分を構成するであろう、強い吸収を受けた銀河核を、撮像観測の高い検出感度で、点源に分解することを目指す。銀河団では、加速など、非熱的成分の強度分布を捉え、銀河団内での高エネルギー荷電粒子の加速現場を同

定しようと考えた。

(2) X 線天文学から新しい波長域へ

これまでの X 線天文学では、10keV 以下の軟 X 線の観測によって、大きな成果を収めて来た。その対象は、多くの場合、前節で言うところの熱的放射である。その例である、X 線連星の降着円盤、超新星残骸、銀河団の高温ガスからの熱放射は、いずれも 10 keV までに限られている。これに対し、ベキ型の非熱的成分は、強い磁場を持つパルサー周辺や、ジェットを持つ天体から良く観測されている。両者が混在する時、10 keV 以上でようやく非熱的成分が優勢となる。前節で述べた、非熱的宇宙を探る試みは、この 10 keV 以上の硬 X 線領域でのみ、初めて可能になる。その意味で、我々は、「古典的」X 線天文学から、新しい波長域へ大きな一歩を踏み出すこと目指す。

この硬 X 線領域のもう一つの特徴は、高い透過力が上げられる。X 線で明るく輝く活動的銀河の中心核の近傍では、大質量ブラックホールへ流入するガスが回りを取り囲み、多くの場合、強い吸収を受ける。視線上的中性水素の柱密度にして 10^{23} H/cm² を越えると、数 keV 以下の軟 X 線は内部を見通すことができず、こうした天体は、数十 keV の X 線で初めて探査することができる。すなわち、硬 X 線を用いることで、「隠れた」大質量ブラックホールを含め、宇宙の進化と共にブラックホールどう進化したか、その全容がようやく明らかになる。

(3) 撮像観測により新しい世界へ

10keV 以上の硬 X 線観測は集光結像系が利用できないため、30 年前の観測以来、コリメータと言う手法のままに留まって来た。我々は次節で述べる、独自の手法で 80 keV まで反射可能な硬 X 線撮像観測システムを開発して来た。集光結像系の利点は 3 つ上げられる。①集光力：遠方の暗い天体を観測するには、大きな有効面積が必要となる。②高感度：硬 X 線領域では、X 線以外の荷電粒子による検出器バックグラウンドによって、感度が抑えられてしまう。天体の像を 1 点に集中させることで、検出器の面積に比例する荷電粒子起源のバックグラウンドを桁違いに減らす。③撮像観測：天体の 2 次元像が得られることは、これも質的に異なる情報が得られる。

この新たな情報により、例えば、銀河団を構成する銀河の中心核からのベキ型成分が、広がった非熱的成分から分離される。もし、銀河団の加速が磁場で起きていれば、電波の連続成分の強度に近い硬 X 線像が得られるに違いない。もし、硬 X 線が銀河団全体に分布するとすれば、局在する加速領域よりも大きく広がることから、陽子加速の可能性が示唆される。

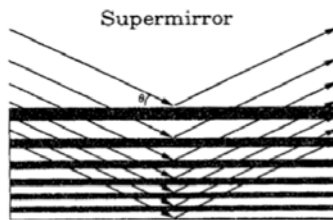
一般に加速により産み出される最大のエネルギーは、その系の大きさ L、平均的な速

度 V 、代表的な磁場 B の積、 $(V \times B \times L)$ と考えられる。もし銀河団で加速が起きているとすると、 L が大きなために 10^{20} eV 近くまで加速が可能になる。これは、現在知られている最高エネルギー宇宙線の加速源の新しい候補になる。この様に、硬 X 線撮像観測により、我々はこれまで手の届かなかった領域に踏み出すことができると考えている。

3. 研究の方法

(1) 独自の観測技術による世界展開

硬 X 線は通常の反射鏡では鏡面内部に入り込み反射されないが、鏡面に多層の周期構造を創成し、各層でのわずかな反射の位相を揃えることで、高い反射率を得る。Pt 等の重金属と炭素等の軽い元素を数 nm ずつ交互に積層することで、自由な層間隔の多層構造を作ることができる。更に、多層構造の周期長 (1 ペアの合計厚さ) を鏡面から基板に向かって徐々に減らして行くことで、広い波長域で高い反射率を得られる多層膜スーパーミラーを新たに開発した。地上の実験と違い、波長が限定できない天文学では、広い波長域での高い反射率は必須であり、ここに至って初めて多層膜反射望遠鏡実用への道が拓けた。



1997年、我々は多層膜スーパーミラーを用いて集光像を得ることに世界で最初に成功した。1000枚近い反射鏡を望遠鏡に組上げたものを、2001、2004年、NASAゴダード研究所のグループと共同で、気球に搭載した

(InFOCuS実験: International Focusing Optics for micro-Crab Sensitivity)。

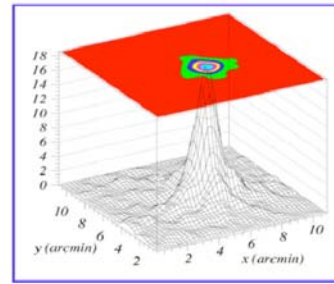


反射鏡



気球用硬 X 線望遠鏡

気球ゴンドラ、制御、検出器はゴダード側が、多層膜反射鏡は名古屋が担当した。その結果、世界で初めて、白鳥座 X-1 の硬 X 線 (25-40 keV) 像観測に成功した。こうした実際の天体の、硬 X 線撮像観測は、世界でも追従を許さない成果であり、本課題で大きく展開する。



気球による
硬 X 線天体の
20-45 keV 像

(2) 実観測により硬 X 線天文学を拓く

硬 X 線撮像観測は、その手法が確立され、いよいよ本格的な観測の時代に入る。しかし、衛星観測までには 7 年あり、その前に気球観測で、具体的な成果を得ることが本研究の計画である。対象として考えている第一は銀河団である。構成する銀河の中心核成分を除いて、真に広がっているか、どこに局在しているか、それにより、硬 X 線を生み出す高エネルギー電子加速の機構を追究する。第二は活動的銀河核の探査と硬 X 線スペクトル観測である。40 keV 付近にピークを持つ X 線背景放射は、あらゆる時代の活動的銀河核からの放射の重ね合わせで説明される。しかし、現在 10 keV 以下の観測で知られた天体だけではならず、10 keV-70 keV での撮像観測が待たれる。

将来的には当然、衛星に搭載して本格的観測を行うことを考えており、Phase-A Study に進んでいた ASTRO-H 衛星の主観測装置として、この硬 X 線望遠鏡が採用されている。本課題では、硬 X 線撮像観測の技術的成熟度を高める事と、それを用いた観測的宇宙物理学の研究に先鞭をつけることにしている。

(3) 気球実験装置の開発 (國枝、古澤、田村、幅)

本課題の研究期間の内に利用可能な気球観測装置は、米国 NASA ゴダード研究所の共同研究者が持つ、InFOCuS (図 1) である。このシステムを使用する時は、以前と同じく、気球ゴンドラ系、検出器系は NASA 側が準備し、我々は、硬 X 線望遠鏡と昼間星カメラを持ち込み、協力して打ち上げ、観測運用を行う事になる。そのため、以下の様な項目の研究を実施する事になった。

- ① 硬 X 線望遠鏡の高性能化: 多層膜の設計の最適化と、多層膜レプリカ法の改良で、より高い効率と結像性能を目指す。これは、平行して準備が始まった、ASTRO-H へのフィードバックが期待できる。
- ② 硬 X 線望遠鏡の X 線集光結像特性測定: 開発した硬 X 線望遠鏡は、SPring-8 へ持ち込み、単色化した細い平行ビームを照射して、焦点面像を取得する。これを元に、飛翔後の観測データの正確な理解を進める。
- ③ 昼間星カメラの開発: 長期フライトでは、昼間でも星を検出して詳細な姿勢決定をし

なければならない。そのために赤外線に感度を持つカメラと、太陽光の迷光を防ぐバツプルを開発することにした。

- ④ 気球システムとI/F確立：NASA側で開発しているゴンドラ、姿勢系、データハンドリング系と、望遠鏡のアライメント、信号系、電気系Inter faceを確立する必要があった。

(3) 気球飛翔計画II.InFOCμS実験 (米国)

米国NASAゴダード研究所のJ. Tueller博士をPIにして、2000年から2期実験を行い、2006年から第3期の計画をNASAへ共同提案した。打上げはNASA/NSBF (国立気球センター) が担当し、Texas州PalestineかNew Mexico州Fort Sumnerの基地から、5-6月期か、9月期に行う。これまでの経験では最大30時間の観測が可能で、昼間の星姿勢系が必要である。この他、オーストラリアでの打上も検討され、特に、南の空にある、我が銀河中心を観測するのに適している。

しかし、米国側の予算削減が行われ、当初予定していた20011年のフライトが2013年に延期されることになった。

4. 研究成果

(1). 気球搭載機器の開発

①ゴンドラ等機構系：望遠鏡を取付けた鏡筒の指向性を高めるため、ゴンドラの重心を気球から下り下げ、その回りで、完全3軸制御をすることを旨とする。右図では、左の四角柱を3軸で制御するため、右側の構造に組み込まれた、二つのホイールと角運動量を交換する。これにより、揺動の励起などを抑え、安定した指向を行う。現在、NASAゴダード研究所で実験が進められている。



②姿勢系：望遠鏡の指向方向を天球上で決めるため、望遠鏡の脇に、星カメラを置き、瞬間の指向方向を捉える。望遠鏡の光軸方向に1台、これと45°方向に2台のカメラを組み合わせたシステムを名古屋で製作し、NASAのゴダード研究所で製作中の鏡筒先端に取付けたのが右の写真である。実際に星空を見て、信号の授受まで確認した。この後は、3本のカメラ軸の精密な関係、X線望遠鏡との相対方向測定を行う。最終的には、ゴンドラを戸外でつり下げ、星カメラの情報を元に、姿勢駆動系を動作させ、天体捕捉性能、その安定性を実証して行く。



ゴンドラに取り付けた Star Camera

(2) 硬 X 線望遠鏡の開発

①望遠鏡の製作：口径40cm、2段の反射鏡を収める鏡筒を製作した。その中に同心円状に多数の反射鏡を収めた (右写真)。これは、気球用に開発したものであり、Astro-H用望遠鏡のモデルとなった。

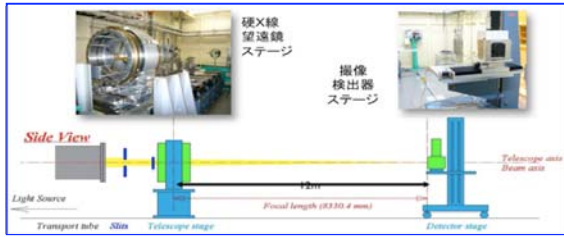
このため、添付の新聞記事では、Astro-Hの製作が始まることを報じる記事にこれを使っている。

我々は1997年以来、10-60 keVの硬X線反射率を高めるために多層膜を成膜する手法を硬X線望遠鏡に導入して来た。今回の反射鏡にも、口径40cm、焦点距離8mの斜め入射光学系に最適設計した多層膜スーパーミラーを成膜している。その製作の工程は、(i) ガラス母型に多層膜を成膜、(ii) エポキシを噴霧した0.15mm厚アルミ基板を接着、(iii) 固着した後、剥がしとり、多層膜を基板側に転写する。成膜装置他を名古屋大学の高専研究院に設置し、量産を行った。このシステムは、引き続き、Astro-Hの搭載用反射鏡の製作に使用されている。

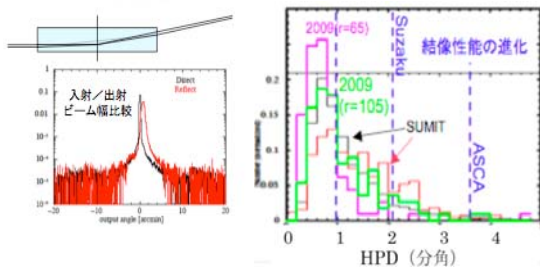


②放射光による硬 X 線特性試験

望遠鏡の硬X線集光特性を測定するためには、単色度、平行度、強い輝度を持つ、放射光SPring-8を用いることにした。特に、Power User課題「X線天文学新展開のための次世代X線望遠鏡システム評価技術の開発」課題番号2009A0088で年間2週間を越えるマシンタイムを確保している。気球実験の焦点距離8mに対応して、望遠鏡と検出器を2つのステージを配置し、硬X線ビームで望遠鏡全面を掃査する。



これにより、反射像を測定することで、表面形状の評価を行う。右図の中央のピークの幅が反射の前（黒）後（赤）で広がる様子が確認できる。これにより、反射鏡個々の形状誤差、望遠鏡全体の結像性能の確認ができる。後述する、2020年代打上げを目指す国際X線天文台(IXO)の光学系をSPRING-8で実施するかどうか検討するために、IXOの望遠鏡検討チーム（國枝が日本側代表）5名をSPRING-8に招き、本気球計画搭載用望遠鏡の実測状況を見学させた。22年度6月にはイタリアで開発中の望遠鏡の測定を計画している。



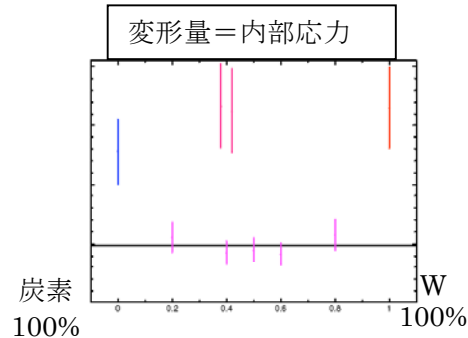
(3) 硬X線望遠鏡開発における新しい知見とそのインパクト

①結像性能の向上：レプリカによる反射鏡の形状を精度を上げるには、形状の良いガラス母型を選ぶ必要がある。右の図は横軸が結像性能（Half Power Diameter）、縦軸が出来上がった反射鏡の割合である。SUMITに向けて選別をした母型を用いると、赤線と黒線のサンプル数の分布となり、すざくの2分角より良い反射鏡が出来た。さらに2009年製作の反射鏡ではさらに小さなHPDに揃った反射鏡が出来る可能性が確認できた。

②散乱強度測定：硬X線は波長が短いために、散乱強度が高まる恐れがある。海外の研究者から、散乱が強まり、空間分解能に至るケースが報告された。我々が製作した反射鏡から反射されたビームの強度分布を、30keVと50keVで測定したものを右図に示す。中央のピークが反射強度のコアであり、鏡面の法線ゆらぎを表し、両側の裾部分は表面粗さによる（回折）散乱である。回折による散乱は、波長が短い程幅、強度が高まる。しかし、我々の反射鏡では表面粗さが0.3nm程度であり、こうした散乱強度の影響が増大する様子は見られていない。このことは、将来、高結像性能を目指すIXOなどで危惧されている結

像性能が硬X線でも5秒角に到達しうることを示唆し、重要なインパクトを与える。

③内部応力の影響：超軽量化のために用いられる薄い鏡面基板では、Pt, Wなどの鏡面物質の薄膜の内部応力での変形が懸念されていた。本研究の中でも、単層膜、多層膜の応力を測定した。右の図はWとCの多層膜、単層膜で発生する内部応力による変形量をまとめたものである。左端が炭素だけ100nm、右端がWを100nm成膜したケースで、ほぼ同程度の大きな変形がみられた。しかし、周期長5nmのW/C多層膜にすると、W、Cの割合にあまりよらず、1/3以下の変形しか見られない。一方、Wを60nm、Cを40nm1層ずつ成膜したケースでは、単層膜とほぼ同じ応力を発揮している。内部の物理にも興味を引かれるが、望遠鏡の鏡面精度を考えると、多層膜の方が有利であり、将来の望遠鏡へ重要な示唆を与えた。



(4) X線衛星すざくによる観測的宇宙物理

①活動的銀河核の観測：すざく衛星で観測した活動的銀河核32個について系統的な解析を行った。これらの天体は気球観測で目指す20-60keVの硬X線観測の重要なターゲットとなる。すざく衛星の、軟X線のカメラと硬X線検出器（望遠鏡無し）の強度変動を比較し、異なる成分の分離に成功した。特に、硬X線成分は銀河核周辺の物質による反射成分と、吸収を受けた、変動するべき成分からなっている。気球観測でも厚い吸収体に覆われた活動的銀河核からのこうした放射が、望遠鏡により、感度良く、検出されると期待される。

②超新星残骸の観測：高エネルギー粒子加速の現場と考えられる超新星残骸の観測では、すざく衛星の軟X線撮像分光器で、膨張するガスの運動速度が直接ドップラー効果で検出された。軽元素が速く、鉄は遅いことも分かり、その速度比較から、超新星を起こした星の進化を推測することができる。ガス運動から、粒子加速へのエネルギー変換プロセスはまだ未解明であるが、硬X線望遠鏡で観測すれば、粒子加速の現場をピンポイントできる可能性がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

Furuzawa, A.; Ueno, D.; Hayato, A.; Ozawa, M.; Tamagawa, T.; Bamba, A.; Hughes, J.; Kunieda, H.; Makishima, K.; Holt S.; Hwang, U.; Kinugasa, K.; Petre, R.; Tamura, K.; Tsunemi, H.; Yamauchi, “Doppler-Broadened Iron X-ray Lines from Tycho’s Supernova Remnant”
Ap. J. L., 693, L61-L65(2009)査読有

Miyazawa, T.; Ogasaka, Y.; Iwahara, T.; Kanou, Y.; Sasakai, N.; Makinaw, Y.; Sasaya, S.; Inukai, Y.; Furuzawa, A.; Haba, Y.; Kunieda, H.; Yamashita, K.; Uesugi, K.; Suzuki, Y.; Tamura, K.; Maeda, Y.; Ishida, M.; Okajima, T.;
“Hard x-ray characterization of the NeXT hard x-ray telescopes at SPring-8”
Miyazawa, T et al.
SPIE Vol. 7011, pp. 70112P- 70112P-8 (2008) 査読無

Miyazawa, T.; Haba, Y.; Kunieda, H.:
“Broad Band Temporal and Spectral Variation of 36 AGN observed with Suzaku”
PASJ, Vol.61, pp.1331-1354(2009)査読有

Ogasaka, Y.; Tamura, K.; Shibata, R.; Furuzawa, A.; Miyazawa, T.; Shimoda, K.; Fuakaya, Y.; Iwahara, T.; Nakamura, T.; Naitou, M.; Kanou, Y.; Sasaki, N.; Ueno, D.; Okajima, T.; Miyata, E.; Tawa, N.; Mukai, K.; Ikegami, K.; Aono, M.; Uesugi, K.; Suzuki, Y.; Takeuchi, S.; Futamura, T.; Takahashi, R.; Sakashita, M.; Sakai, C.; Nonoyama, M.; Yamada, N.; Onishi, K.; Miyauchi, T.; Maeda, Y.; Okada, S.; Serlemitsos, P.; Soong, Y.; Chan, K.; Rohrbach, S.; Berendse, F.; Tueller, J.; Tsunemi, H.; Kunieda, H.; Yamashita, K.;
“Characterization of a hard x-ray telescope at synchrotron facility SPring-8”
Japanese Journal of Applied Physics
Vol.47, pp.5743-5754(2008)査読有

Ogasaka, Y.; Tamura, K.; Miyazawa, T.; Fukaya, Y.; Iwahara, T.; Sasaki, N.; Furuzawa, A.; Haba, Y.; Kanou, Y.; Ueno, D.:

“Thin-foil multilayer-supermirror hard x-ray telescopes for InFOCUS/SUMIT balloon experiments and NeXT satellite program”
SPIE Vol. 6688, pp. 3-8 (2007) 査読無

[学会発表] (計2件)

Kunieda, H. (Invited talk)
“Multilayers for X-ray astronomy”
Frontiers of Optical Coatings
11-16 October 2009, Xi’an, P. R. China

Kunieda, H. (Invited talk)
“Two challenges of the international mission NeXT --High resolution spectroscopy and broad band X-ray imaging”
Putting Gravity to Work” Symposium. July 21-25, 2008 Cambridge UK

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他] ホームページ:

<http://www.u.phys.nagoya-u.ac.jp/uxgj.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國枝秀世 (KUNIEDA HIDEYO)
名古屋大学大学院理学研究科・教授
研究者番号: 00126856

(2) 研究分担者

・田原譲 (TAWARA YUZURU)
名古屋大学エコトピア科学研究所・教授
研究者番号: 10135296
・松本浩典 (MATSUMOTO HIRONORI)
名古屋大学現象解析研究センター・准教授
研究者番号: 90311365
・幅良統 (HABA YOSHITO)
名古屋大学現象解析研究センター・特任助教
研究者番号: 60377950
・小賀坂康志 (OGASAKA YASUSHI)
名古屋大学大学院理学研究科・助教
研究者番号: 10324386 2007-2008年度