

Athena計画—Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics—



松本 浩典

〈名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) 現象解析研究センター 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: matumoto@u.phys.nagoya-u.ac.jp

欧州宇宙機構が2028年に打ち上げる大型衛星計画Athenaは、ASTRO-H衛星の後、確定している世界で唯一の大型X線天文台である。大面積・高角度分解能を誇るX線望遠鏡、高エネルギー分解能のTES X線カロリメーター、広い視野のDEPFET半導体検出器を搭載し、X線天文学の新たな時代を切り開くと期待される。すざく衛星で行おうとしたX線カロリメーターによるX線天文学は、ASTRO-H衛星によってようやく実現し、そしてAthena衛星によってさらに発展する。本稿ではAthena計画の概要を説明し、日本の研究者がAthenaにどのように関わるのかを述べる。

1. Cosmic Vision

欧州宇宙機関 (European Space Agency; ESA) は「Cosmic Vision」として、宇宙ミッションによって挑戦すべきサイエンス課題の長期計画をまとめている¹⁾。この計画に沿って2028年に打ち上げ予定の大型サイエンスミッションが挑むサイエンステーマとして、2013年11月に“The Hot and Energetic Universe”が選ばれた²⁾。これは、

- 1) “Hot Universe”: どのようにして物質が累積して、今日の大規模構造を形成したのか
- 2) “Energetic Universe”: どのようにして超巨大ブラックホールは成長し、そして宇宙に影響を与えたのか

という、宇宙物理の二つの根本問題の解明を目指すものである。

そして2014年6月、“The Hot and Energetic Universe”に挑戦するためのミッションとして、“Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics (Athena)”が選ばれた。

現在の宇宙では、重力で束縛された最も大きな系は、銀河団である。そして宇宙の物質の大部分

は、銀河団や銀河群の高温ガスという形で存在する^{3),4)}。したがって、“The Hot Universe”のテーマに挑戦するには、銀河団ガスの分布と物理状態を解明し、宇宙の歴史の中でどのように進化してきたのかを明らかにしなければならない。“The Energetic Universe”のテーマに挑戦するには、近傍から最遠方に至るまで、濃い塵の中に奥深く隠されたものも含めて、銀河中心核の超巨大ブラックホールを探し出し、ブラックホールが成長するにつれて、エネルギーや物質がどのように流入・放出されているのかを明らかにしなければならない。銀河団ガスの温度は通常数千万度でありX線で輝く。また超巨大ブラックホールの事象の地平面近傍でも、高エネルギー現象が起これ、X線が発生する。このように、“The Hot and Energetic Universe”のサイエンステーマに挑むには、X線観測が柱になる。したがってAthenaはX線天文衛星である。

2. Athena搭載機器

サイエンステーマの解明のため、Athenaは三つの鍵となるX線検出機器を搭載する (図1)。



図1 X線天文衛星 Athenaとその搭載機器.

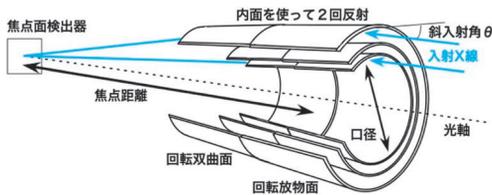


図2 ウォルターI型X線光学系.

Silicon Pore Optics (SPO): シリコンポア光学系技術を用いた大面積かつ高角度分解能のX線望遠鏡.

X-ray Integral Field Unit (X-IFU): 超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor; TES) を利用した高エネルギー分解能X線カロリメーター.

Wide Field Imager (WFI): シリコンDEPFETセンサーを用いた広視野X線検出器.

以下でそれぞれの特徴を紹介する.

2.1 X線望遠鏡SPO

宇宙観測用X線望遠鏡は、ウォルターI型光学系⁵⁾を採用している(図2). これは、バウムクーヘン状に並べた反射鏡内面でX線を小角度で2回反射させ、焦点へと集光する光学系である. 角度分解能を高めるには、反射鏡の形状精度を向上させなければならない. そのためには、通常は硬くて丈夫な反射鏡基板を用いる必要がある. すると、1枚のX線反射鏡が重くなるため、1台の

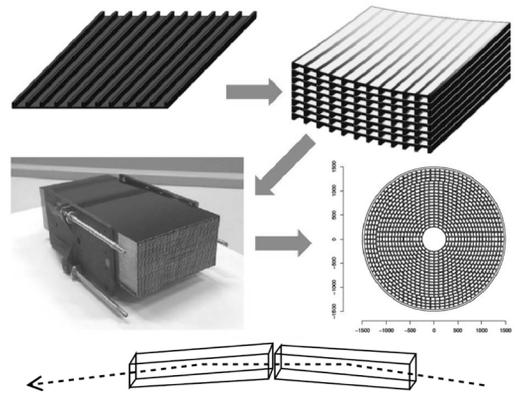


図3 SPOによるX線望遠鏡. 上左: 溝を形成したシリコン基板. 上右: 反射面コーティングを行ったシリコン基板を積層したもの. 中左: SPOモジュール. 中右: モジュールを並べたX線望遠鏡. 下: 一つ一つの穴がウォルターI型光学系として機能する様子.

望遠鏡に搭載する総数を増やすことができない. つまり、ロケットによる打ち上げ可能な限られた重量で、望遠鏡の角度分解能と集光能力(有効面積)の両方で最高度の性能を出すことは、一般には非常に難しい.

AthenaのX線望遠鏡はこの課題を克服するために、Silicon Pore Optics (SPO) によるX線望遠鏡を搭載する(図3). これは、軽量ながらもX線結像光学素子として十分な形状精度と表面粗さを持つ市販のシリコンのウェハを望遠鏡基板として使用する. シリコンウェハを切り出し、後で積層したときにウォルターI型になるように、基板厚みに僅かに傾斜をつける. 基板にリブを切り出した後、反射面金属(イリジウムなど)を付ける. シリコン基板を望遠鏡半径に合わせて曲げ、リブをスペーサーとして積層し、モジュールを作る. モジュールには、約2mm×0.6mm程度の穴(穴のサイズはまだ最適化中である.)がたくさん形成され、この一つ一つがウォルターI型光学系として機能する. このモジュールを1,000個程度並べて直径約3m程度のX線望遠鏡を形成する. SPO技術を用いた結果、焦点距離

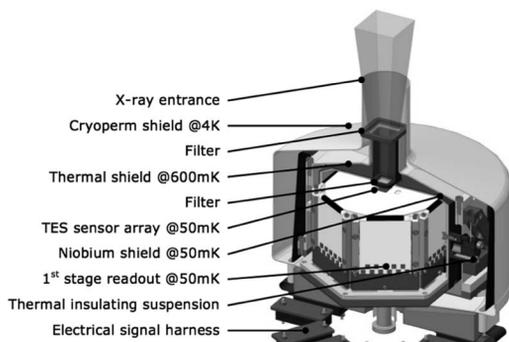


図4 TES X線カロリメーター X-IFU¹¹⁾.

12 m, 角度分解能約5秒角^{*1}, 1 keVのX線に対する有効面積2 m²のX線望遠鏡が実現できると期待されている⁶⁾.

2.2 X線カロリメーター X-IFU

X線カロリメーターは、素子にX線光子が吸収される際の温度上昇を測定し、X線光子のエネルギーを精密測定する。回折格子と異なり、銀河団や超新星残骸などの空間的に広がった天体からのX線でも、スリットなしで高効率で分光できる。またエネルギー分解能が、X線光子のエネルギーに依存しない。X線カロリメーターによるX線天文学は、本当はすざく衛星⁷⁾あるいはその前のASTRO-E衛星が先鞭を付ける予定だったが、残念ながら成功しなかった。2016年に打ち上げ予定のASTRO-H衛星に搭載され⁸⁾⁻¹⁰⁾, 新しいX線天文学を切り開くと期待されている。

AthenaのX線カロリメーター (X-ray Integral Field Unit; X-IFU)¹¹⁾ は、すざく衛星やASTRO-H衛星のカロリメーターの発展版にあたる(図4)。ASTRO-Hのカロリメーター Soft X-ray Spectrometer (SXS)¹⁰⁾ との性能の比較を表1に掲げる。SXSが温度上昇測定に半導体温度計を使用するのに対して、X-IFUは超伝導遷移端温度計を使用する。これにより、エネルギー分解能が上昇している。また、素子のピクセル数も100倍以上に

表1 Athena X-IFU vs. ASTRO-H SXS.

	X-IFU	SXS
エネルギー範囲	0.2-12 keV	0.3-12 keV
エネルギー分解能 [†]	~2.5 eV	<7 eV
サイズ	直径5分角	2.9分角四方
ピクセル数	3,840	6×6

[†]: E=6 keVのX線に対して。

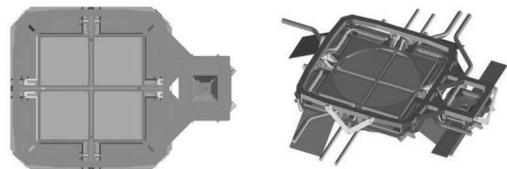


図5 広視野X線撮像器WFI¹²⁾. 左はX線の入射側から、右はその反対方向から見た図。

増えている。SPOの優れた角度分解能と相まって、SXSでは難しい、詳細な空間分解分光が可能になる。

2.3 広視野検出器 WFI

後述するように、Athenaは高赤方偏移の活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) や銀河団をX線で探し出すことも重要な目的である。そこで、広視野をもつ撮像分光器 Wide Field Imager (WFI)¹²⁾ を搭載する(図5)。WFIはMOS型のDEPFETを用いた検出器である。現行のX線天文学では、撮像分光素子としてX線CCDが主流となっており、CCDは各ピクセルの信号電荷を転送して順に読み出す方式をとる。したがって全ピクセル読み出しに数秒かかるという欠点がある。もしAthenaにX線CCDを搭載したら、SPOが大面積を誇るので、1回の露光で一つのピクセルに複数以上の光子が到来し(パイルアップ)、一つの光子のエネルギー測定が不可能になるだろう。これに比べてDEPFETは、転送しないで読み出すことが可能で、そのため読み出しが速い。エネルギー分解能はX線CCDと同等であり、6 keVのX線に対して、約130 eVである。図5に

*1 Half Power Diameter (HPD) で評価した値。すなわち、点光源からのX線を焦点面に集光したとき、半分の光量を含む円の直径。

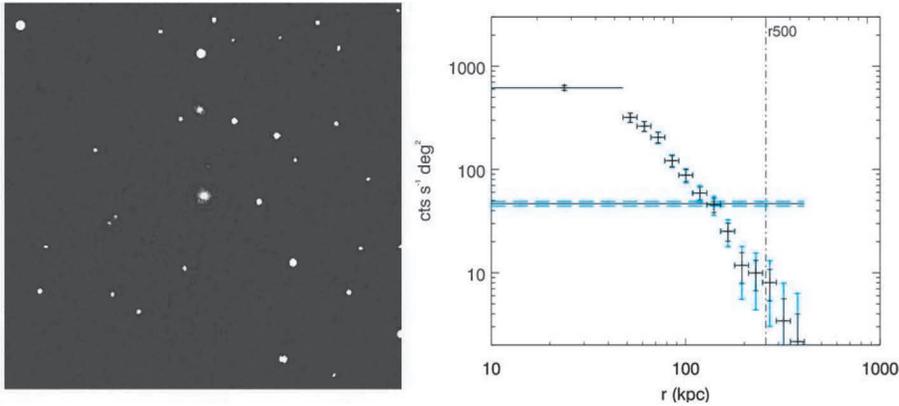


図6 WFIによる、 $z=2$, $M_{500}=3.5 \times 10^{13} M_{\odot}$ の遠方銀河団の観測シミュレーション。左: X線イメージ。右: 輝度分布。文献12より。

あるように、約40分四方の視野を四つの素子でカバーし、各素子は 512×512 程度のピクセル数である。約0.5ミリ秒で1素子を読み出すことが可能である。またX線CCDの場合、宇宙線による放射線損傷で電荷転送効率が徐々に悪化し、エネルギー分解能が悪くなるという現象が避けられなかった。しかし電荷転送のないDEPFETでは、そのような性能の経年劣化はないと期待されている。

3. 科学目標

この章では、Athenaが挑戦する科学目標の、ほんのいくつかを紹介しよう。

まず“Hot Universe”関係のテーマについて述べる。銀河団・銀河群は、ダークマターによる重力ポテンシャルの井戸の中に、バリオンが落ちて溜まっていくことによって形成される。この形成過程は、おそらく $z \sim 2$ から開始すると予想されている。そして、おそらく非重力的な加熱過程が、バリオンの集積に大きな影響を与えると考えられる。したがってバリオンの集積過程を解明するには、 $z > 2$ にあると思われる宇宙最初の高温度ガスで満たされた銀河団を探し出さなければならない。Athenaは約5年のミッション寿命が想定されており、その間にWFIによるサーベイ観測

で、 $z > 2$ で $M_{500} > 5 \times 10^{13} M_{\odot}$ の銀河団を50個程度探し出すことが期待されている。ここで、 M_{500} とは、平均密度が宇宙臨界密度の500倍になる半径の内側に含まれる質量である。例えば図6のようなX線イメージが得られると予想される。このイメージから輝度分布が得られ、スペクトルからわかる温度、密度の情報を合わせると、銀河団ガスのエントロピー分布がわかる。エントロピー分布は、重力以外の加熱過程がどの程度効いているのかを反映している¹³⁾。また、遠方銀河団をX-IFUで分光すると、図7のようなスペクトルが得られる。この詳細なX線スペクトルから、銀河団ガスの温度、密度、重元素組成比が精度よくわかる。近傍銀河団の重元素組成比と比較すれば、宇宙の化学進化の解明が期待できる。

次に“Energetic Universe”関連のテーマについて述べよう。超巨大ブラックホール(Super-Massive Black Hole; SMBH)がどのようにして誕生したのかを知るには、おそらく $z \sim 6-8$ にさかのぼり、誕生したばかりのSMBHをもつAGNを探し出し、その当時の成長(=質量降着)と、銀河に与える影響を解明しなければならない。WFIによるサーベイ観測で、 $z=6-8$ で400個以上のAGNが発見できると期待されている¹⁴⁾。このサンプルを用いれば、図8のような光度関数を

構築出来る。この光度関数によって、SMBHが誕生初期にどのように成長したのかを知ることができる¹⁴⁾。

SMBHは初期の成長に続いて、 $z \sim 1-4$ で分厚い星間物質や塵に覆われる時代を迎え、激しい質量降着で成長すると考えられている。このようなAGNは、SMBHの急激な激しい成長を暴くため

の鍵を握る種族だと考えられている。図9に示すように、Athenaによれば、この種族が20個以上検出されることが予想される。そして、スペクトルを解析することで、周辺の物質質量や、質量降着率がわかり、SMBHの成長の様子を知ることができる¹⁸⁾。

ほかのサイエンステーマについては、Athenaウェブページのサイエンスサポートドキュメント¹⁹⁾を参照されたい。

4. 日本の役割

現在のところ、ASTRO-Hより後の国際X線天文台としては、Athenaが世界で唯一の確定したプロジェクトである。X線天文学は、飛翔体が行わなければならない。2030年代以降の世界のX線天文学の発展を支えるために、日本の高エネルギー宇宙物理学連絡会(高宇連)は、Athenaをサポートし、すざく衛星やASTRO-H衛星などの開発から得た経験を、Athenaの成功のために生かすことを決断した。宇宙科学研究所にAthenaワーキンググループ設置されており、現在松本が主査を務めている。

現在AthenaはフェーズAに入っている。2020年頃に予定されているミッション選択までは、実

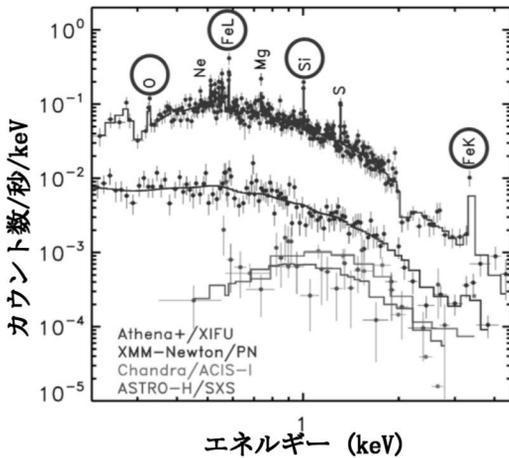


図7 X-IFUによる $z=1$ の遠方銀河団のスペクトルのシミュレーション。温度 $kT=3$ keV, X線光度 $L_x=10^{44}$ erg s^{-1} を仮定。XMM-Newton, Chandra, ASTRO-H SXSに対するシミュレーションも示されている。丸囲みは、化学進化解明のために重要な特性X線。文献13より。

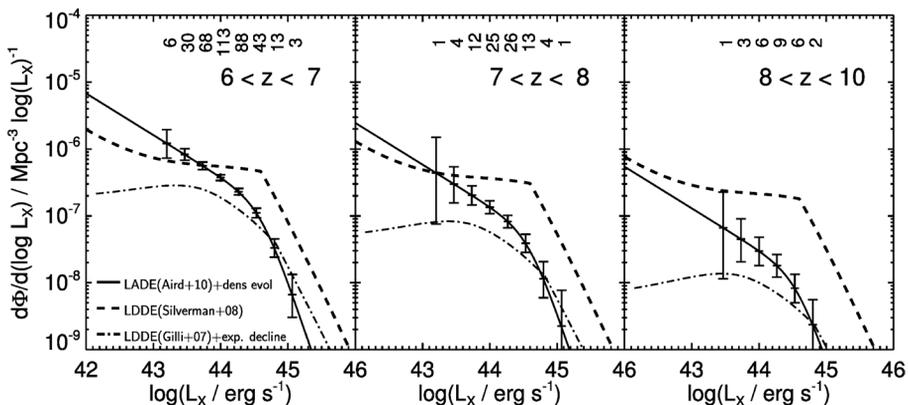


図8 WFIサーベイ観測で期待される、高赤方偏移AGNのX線光度関数。実線およびデータ点は、あるモデル¹⁵⁾から予想される光度関数と、それを用いたシミュレーション。上部の数値は、各ビンで検出されるAGNの数。鎖線や一点鎖線は、他のモデル^{16), 17)}による予想を示す。文献14より。

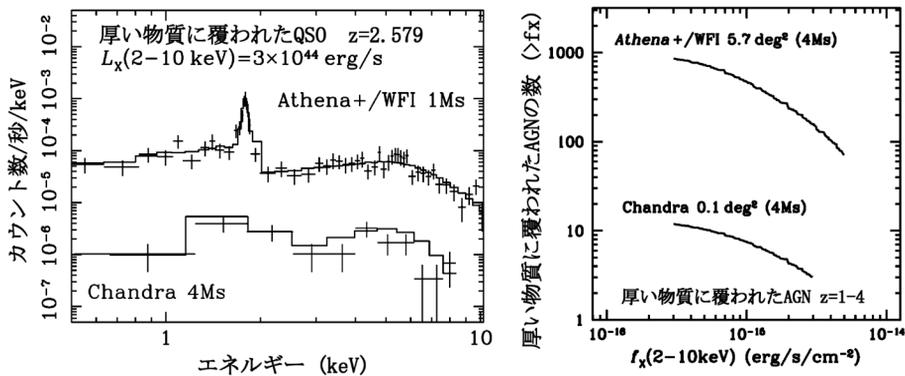


図9 厚い塵に覆われたAGNの観測シミュレーション¹⁸⁾。左: $z=2.59$ のAGNのWFI観測のシミュレーション。観測時間1メガ秒。Chandra衛星による4メガ秒の観測シミュレーションも示されている。右: 4メガ秒で5.7平方度の領域をWFIでサーベイ観測した場合に予想される, 厚い塵に覆われたAGNの数。Chandra衛星では, 4メガ秒でも0.1平方度しか観測できず, ずっと少ない数しか検出できない。

現可能性, サイエンスへのインパクトをもとに, 各機器の詳細なコンフィグレーションを検討する。この調査をリードするため, Athenaサイエンススタディチーム (ASST) がESAによって結成されており, 日本からは松本が参加している。また, 打ち上げまでまだ10年以上もあるのに, Athenaはすでにサイエンス観測の素案の立案を開始している*2。キーププロジェクトである“Hot and Energetic Universe”の達成はもちろん, 公開天文台としてほかにどのような観測を遂行すべきかの検討が行われている。ASSTの下部組織としてAthenaサブワーキンググループが, 各観測カテゴリーごとに結成され, 日本の研究者約30人が参加している。そのうち, 松本をはじめとする7名はサブワーキンググループのリーダーを務めており, 観測計画に日本の研究者の意志を反映すべく, 議論に参加している。

ミッション機器開発として, 日本に大きく期待されているのが, X-IFUの冷凍機システム開発である。X-IFUは約50 mKまで冷却しなければならない。この冷却系は, 検出器を冷却する検出器クーラー部, 検出器クーラー部を覆うシールド

クーラー部に分かれる。日本は, すざく衛星やASTRO-H衛星, 赤外線衛星のあかりやSPICAなどを通じて, 冷凍機開発の経験を蓄積している。Athenaの前進であるIXO計画²⁰⁾時にも, 日本にはカロリメーターの冷凍機システム開発が期待されていた。このような経緯も踏まえ, 日本にはシールドクーラー部への貢献が大きく期待されている。具体的には300 Kから4 Kの熱シールド, および約20 K, 約100 Kの熱シールドを冷却する機械式冷凍機, その駆動回路, および, 必要な周辺装置の開発である。一方, WFIやSPOのハードウェア開発に関しては, 日本の参加は現在議論中である。また, Athena TOO観測に対応する地上局や, キャリブレーションに対する貢献も, 現在議論中である。

5. まとめ

Athenaは, 2030年代, 世界で唯一の大型X線天文台となるだろう。すざく衛星で先鞭を付けたかったX線カロリメーターによるX線天文学は, ASTRO-H衛星でいよいよ実現され, そしてAthenaでさらに発展する。本稿で説明した“Hot

*2 正直私は, 「ASTRO-Hのカロリメーターのデータを見てから, じっくり議論したほうが良いのではないか」と思い, そのようにASSTミーティングでも発言しているが, この時期から観測プランを立てるのがヨーロッパ流のようである。

and Energetic Univer”の科学目標のほかにも、さまざまな観測で成果を上げ、高エネルギー天文学の新たな時代を切り開くに違いない。日本は、これまでの経験を生かしてAthenaを成功に導き、また大きな科学的成果を上げていきたい。

謝 辞

本稿は、一般の天文月報の読者には、初めてのAthenaの紹介文となるだろう。このような機会を与えていただいた天文月報編集委員会の皆様に感謝いたします。また、主にオランダのESTECで、数カ月に一度開かれるASSTミーティングへの参加にあたっては、宇宙科学研究所より旅費の支援をいただいています。改めてここに感謝いたします。

参考文献

- 1) “Cosmic Vision: Space Science for Europe 2015–2025,” ESA Brochure, Vol. BR-247, 2005
- 2) Nandra K., et al., 2013, arXiv: 1306.2307
- 3) Fukugita M., Hogan C. J., Peebles P. J. E., 1998, ApJ 503, 518
- 4) Shull J. M., Smith B. D., Danforth C. W., 2012, ApJ 759, 23
- 5) Wolter H., 1952, Ann. Phys. 445, 94
- 6) Willingale R., et al., 2013, arXiv: 1307.1709W
- 7) Kelly R. L., et al., 2007, PASJ 59, S77
- 8) 高橋忠幸, 2016, 天文月報 109, 31
- 9) Takahashi T., et al., 2014, Proc. of SPIE 9144, 914425-3
- 10) Mitsuda K., et al., 2014, Proc. of SPIE 9144, 91442A-1
- 11) Barret D., et al., 2013, arXiv: 1308.6784
- 12) Rau A., et al., 2013, arXiv: 1308.6785
- 13) Pointecouteau E., et al., 2013, arXiv: 1306.2319P
- 14) Aird J., et al., 2013, arXiv: 1306.2325
- 15) Aird J., et al., 2010, MNRAS 401, 2531
- 16) Gilli R., et al., 2007, A&A 463, 79
- 17) Silverman J. D., et al., 2008, ApJ 679, 118
- 18) Georgakakis A., et al., 2013, arXiv: 1306.2328
- 19) Athenaサイエンスサポートドキュメント <http://www.cosmos.esa.int/web/athena/supporting-sci-documents>
- 20) White N. E., et al., 2010, X-ray Astronomy 2009; Present Status, Multi-Wavelength Approach and Future Perspectives 1248, 561 (arXiv: 1001.2843)

The Athena Project—Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics—

Hironori MATSUMOTO

Center for Experimental Studies, Kobayashi-Maskawa Institute (KMI), Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: ESA's large space mission, Athena, will be the only great X-ray observatory in the 2030's. Athena is expected to open the new frontier of X-ray astronomy.