

Astro-E2 で切り開く新しい宇宙像

—第一期公募観測に向けて—

国 枝 秀 世

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: kunieda@astro.isas.jaxa.jp

Astro-E2 衛星は 2005 年 2 月打ち上げを目指し準備が進められています。本稿では、Astro-E2 衛星の概要と、第一期公募観測（締切：2004 年 8 月 18 日）に向けて観測提案の参考となる情報を述べたいと思います。

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究本部 (ISAS) では次期 X 線天文衛星「Astro-E2」を 2005 年（平成 17 年）2 月に打ち上げるべく準備を進めています。この衛星の復活につきましては、天文学会をはじめとする関係者の皆様のご協力をいただいたことを御礼申し上げます。

さて、Astro-E2 衛星をより多くの天文学関係者に活用していただくため、打ち上げ後約 7 カ月間の衛星の軌道上試験および試験観測の後、公募観測を開始します。本稿では、広い分野の研究者の皆様から応募していただく際に参考になるよう、Astro-E2 衛星の概要・科学的目標・観測公募と提案の準備の仕方などを述べたいと思います。より詳しい公募内容および技術的資料は、Astro-E2 ホームページ <http://www.astro.isas.jaxa.jp/astroe/> からたどることができます。

2. Astro-E2 衛星

2.1 衛星概要

Astro-E2 衛星の最大の特徴は、約 6~7 eV のエネルギー分解能による高分解能 X 線分光と、0.2~600 keV の広帯域 X 線分光です。Astro-E2 には

5 台の軟 X 線望遠鏡と 1 台の硬 X 線検出器が搭載されています (図 1)。軟 X 線望遠鏡はそれぞれ X 線反射鏡 (XRT = X-Ray Telescope) と焦点面検出器の対からなっています。その焦点面検出器の 1 台が、X 線マイクロカロリメーターアレーを検出器とする X 線分光器 (XRS = X-Ray Spectrometer) です。これは 0.3 から 12 keV のエネルギー範囲を半値幅 6~7 eV の高いエネルギー分解能で観測します。残りの 4 台の X 線望遠鏡の焦点面検出器は X 線 CCD カメラ (XIS = X-ray Imaging Spectrometer) で、エネルギー分解能は XRS に比べて劣るものの (6 keV で半値幅約 130 eV)、広い視野にわたる撮像能力を担っています。5 台の XRT はレプリカ法によって製作された斜入射 X 線フォイルミラーを、同心円状に約 170 枚並べた多重薄板型の X 線反射鏡です。焦点距離は XIS 用が 4.75 m、XRS 用が 4.5 m でともに金でコーティングされています。これらの軟 X 線望遠鏡は 0.2 keV から 12 keV のエネルギー範囲に感度を持ち、それ以上 600 keV までは硬 X 線検出器 (HXD = Hard X-ray Detector) がカバーします。表 1 に Astro-E2 の観測装置の性能諸元を示します。以下、各検出器についてもう少し説明します。

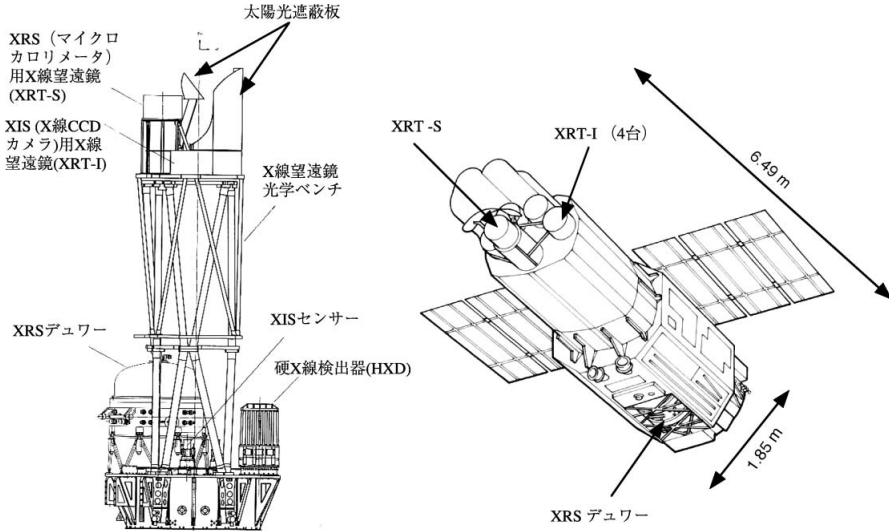


図 1 Astro-E2 衛星の構造. 右は、軌道上での衛星の姿. 左は、観測装置の配置を示すため、衛星の横外壁を取り除いた状態で示しました. X 線望遠鏡が取り付けられている光学ベンチは、軌道上で約 1.5 m 伸展されますが、左の図では打ち上げ時の格納状態を示しています (宇宙科学研究本部提供).

表 1 Astro-E2 衛星の観測装置性能

	XRT+XIS	XRT+XRS	HXD	
エネルギー範囲	0.2~12 keV	0.3~12 keV	10~600 keV	
有効面積	1,460 cm ² (4 台分 @1.5 keV)	190 cm ² (@1.5 keV)	160 cm ² (@20 keV)	330 cm ² (@100 keV)
焦点距離	4.75 m	4.5 m		
望遠鏡角分解能*	2'	2'		
視野	18'×18'	2.9'×2.9'	0.56°×0.56°	4.5°×4.5°
			(約 100 keV 以下で) (約 100 keV 以上で)	
画素の大きさ	1.1''×1.1''	0.49'×0.49'		
画素数	1,024×1,024	30 (6×6 配置)		
エネルギー分解能†	130 eV (@6 keV)	6.5 eV	3.0 keV	7.6/√E/MeV %
時間分解能	7.8 ms~8 s	~100 μs	~100 μs	

* 点源からの光子の 1/2 が入る直径

† 半値幅

2.2 XRS

X 線マイクロカロリメーターは、入射した X 線光子一つ一つのエネルギーを素子の温度上昇として検出するもので、優れたエネルギー分解能と 100% に近い高い検出効率を同時に併せ持っています。これに対して、チャンドラ衛星 (アメリカ) と XMM ニュートン衛星 (ESA) には分散型の回折格子分光装置が搭載されており、すでに大きな成果を上げていますが、これらと比べて XRS に

は強みがあります。図 2 ではこれらの観測装置と、Astro-E2 衛星搭載 XRS の性能比較を行っています。図 2(a) は X 線望遠鏡と検出器を込みにした有効面積を X 線エネルギーの関数として示したもので、(積分時間一定の場合の) 検出感度のよい目安となります。図 2(b) にはエネルギー分解能をエネルギーの関数と示しました。これらから、約 2 keV 以上のエネルギー範囲では検出感度・エネルギー分解能の両方で XRS が最も優れ

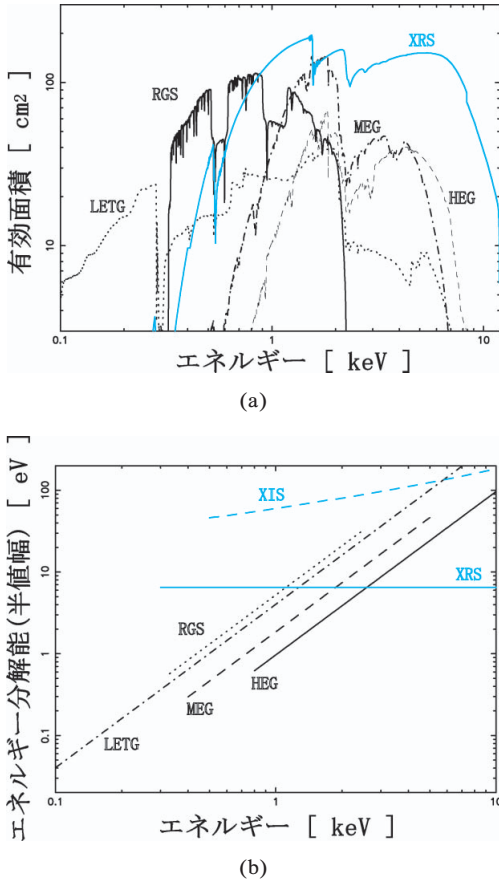


図 2 X線高分解能分光装置の比較. (a) X線反射鏡の有効面積と検出器の検出効率を組み合わせた全有効面積. (b) エネルギー分解能. LETG=Low Energy Transmission Grating, MEG=Medium Energy Grating, HEG=High Energy Grating (以上チャンドラ衛星), RGS=Reflection Grating Spectrometer (XMM ニュートン衛星). チャンドラ衛星や XMM ニュートン衛星の分散系分光器と比較して, 約 2 keV 以上のエネルギー範囲では有効面積・エネルギー分解能において, Astro-E2 XRS が最も優れていることがわかります.

ていることがわかります. 分散系の分光器は, 検出効率が低く, 空間的に広がった X 線源の観測に制約があります. 宇宙観測で重要な, 鉄からの K 特性 X 線 (静止系で 6.4~6.9 keV) の観測や, 銀河団や超新星残骸など空間的に広がった天体の高分解分光観測は Astro-E2 XRS の独壇場となる

でしょう.

XRS は宇宙の高エネルギー現象の研究に新しい局面を切り開くと期待されます. XRS の特長を活かす観測は, 広がった X 線源の分光観測と, 点源であっても 2 keV 以上のエネルギー範囲が重要な分光観測で, かつ, 単にスペクトル線を検出するだけでなく, 6 eV の分解能でスペクトル構造を分解することが本質的に必要な観測です. 次章のシミュレーションで示すように, 100 eV の分解能では 1 本の輝線にしか見えなかった鉄の K 輝線が, XRS では共鳴線, 禁制線などに分解されます. これらの輝線の微細構造は X 線を出すプラズマの電子密度や, 輝線を出すイオンが光でイオン化したのか熱的な分布の電子でイオン化したのかなどのイオン化の素過程などを反映するため, プラズマ診断の強力な手段となります. 一方, 輝線や吸収線スペクトルは, さまざまな原因で 10 eV 程度のエネルギー偏移や線幅の広がりを持つと予想されます. 輝線の中心エネルギーの決定精度は十分な光子統計があれば 2 eV となると期待され, 6~7 keV のエネルギーの輝線であれば, 数百 km s⁻¹ の運動が輝線のエネルギー偏移から検出可能です. したがって, X 線連星の X 線星自身の運動や, 降着流の運動, 銀河団内の高温ガスの巨視的な運動などを決定することができます.

2.3 XIS

XIS は撮像と中程度のエネルギー分解能での分光を行います. 4 台の XIS のうち, 2 台は表面照射型, もう 2 台は裏面照射型 CCD が搭載されます. いずれの CCD も, チャンドラ衛星に搭載された ACIS 検出器と同じくマサチューセッツ工科大学リンカーンラボ製ですが, これまでの経験に基づいてさまざまな改良が加えられています. 以下, チャンドラ衛星および XMM ニュートン衛星に搭載された CCD カメラと比較しながら, XIS の特徴を紹介します. 最も大きな違いは軌道上での放射線レベルです. 両衛星は地球から離れる長楕円軌道をとっていますが, その放射線は予想よ

り大きく、チャンドラでは低エネルギー陽子による損傷でエネルギー分解能が劣化しました。また XMM ニュートン衛星では非 X 線バックグラウンドが大きく、しかも激しく時間変動をします。それに対して Astro-E2 衛星では、放射線レベルが低く、その性質もよくわかっている低周回軌道を選択しています。その結果、両衛星に比べ、放

射線ダメージおよび非 X 線バックグラウンドが低く、時間的にも安定していると予想されます。さらに、XIS では裏面照射型の CCD 素子に改良が加えられ、XMM ニュートンおよびチャンドラに比べて 1 keV 以下でのエネルギー分解能が著しく改善されました。有効面積はチャンドラより大きく、ほぼ XMM ニュートンのそれに匹敵しま

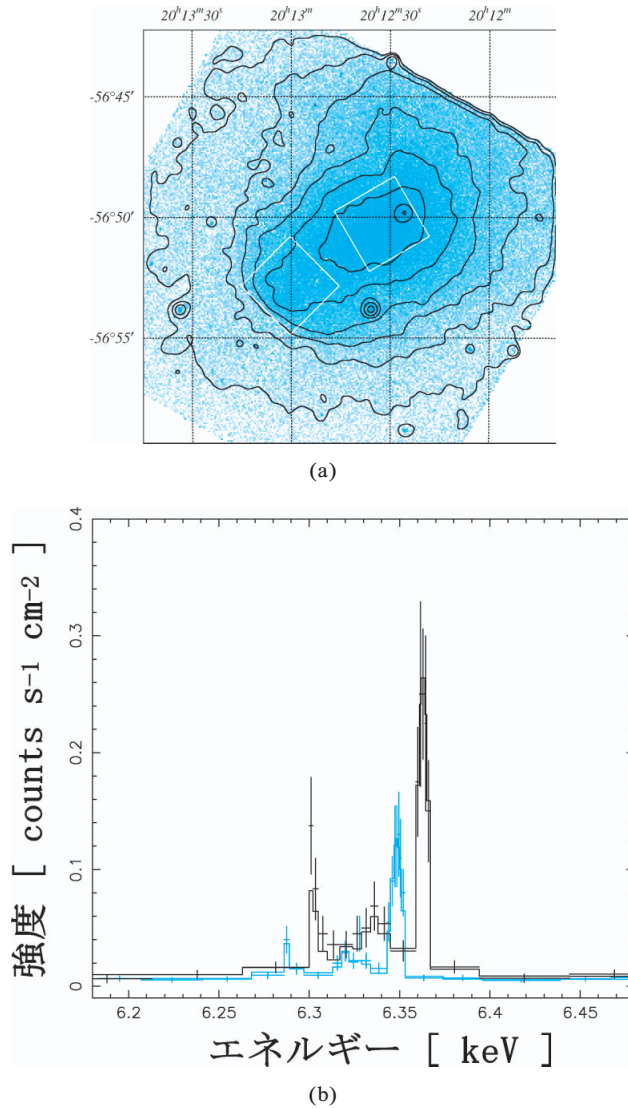


図 3 (a) Abell 3667 銀河団のチャンドラ衛星による X 線画像. (b) XRS による鉄 K 輝線周りのスペクトルのシミュレーション. 黒色: (a) の中心部の四角の領域, 青色: 東南部.

す。以上の特徴より、広がった X 線放射についてはこれまでで最も感度の高い X 線検出器となると予想されます。また、一般に CCD は明るい X 線源の観測が容易でないという問題がありますが、XIS ではいろいろなモードを備え、最大時間分解能は 7.8 ミリ秒に達するとともに、かに星雲並みの明るい X 線源も観測が可能です。

2.4 HXD

硬 X 線検出器は無機シンチレーターのガドリニウム・シリケート (GSO) とシリコン検出器を組み合わせたもので、10~600 keV の範囲の硬 X 線を観測します。筒状に伸びた井戸型のシールド用シンチレート (BGO) で主検出部を囲うことで、周りからの雑音ガンマ線や宇宙線を徹底的に除去し、特に 10~300 keV で世界最高の感度を実現します。

3. Astro-E2 衛星による科学的目標

観測立案を効率よく進めるために、これまでに Astro-E2 サイエンスワーキンググループ (SWG = Science Working Group; ハードウェアとソフトウェアの開発者を中心とする Astro-E2 衛星の科学的方向性を議論するグループ) によって、Astro-E2 の能力を最大限に活かす観測計画が立案されています。ここでは、その観測対象を例にとって、Astro-E2 衛星による典型的な科学的目標を説明します。

3.1 銀河団

銀河団は可視光では数十から数百個の銀河の集まりですが、X 線ではそれらの銀河間を満たすように広がっている温度 1,000 万度から 1 億度の高温ガスとして観測されます。強い鉄の K 輝線を放射し、広がった天体である銀河団は、XRS の特長を最も活かすことのできる天体の一つです。

高温ガスは銀河から放出された大量の重元素を含んでおり、高階電離したイオンからの輝線スペクトルが観測されます。銀河団は等温で力学的に平衡状態に達していると考えられてきましたが、

「あすか」衛星などの X 線観測により、大規模な高温ガス同士の衝突や合体による進化の途中であることが明らかになってきました。図 3(a) はチャンドラ衛星で観測された Abell 3667 銀河団の X 線画像です。中心から東南(左下)の方向で輝度が急激に落ちている部分があることがわかります。いっぽう、ガスの温度はその最前部を境に約 2 倍も高くなっていました¹⁾。内側の冷たいガスは $1,000 \text{ km s}^{-1}$ 以上もの速さで動いていることが予想され、まさに銀河団内でガスが衝突している現場と考えられます。このような、ガスの高速運動の存在を示唆する温度や輝度、あるいは重元素の複雑な構造は、他の多くの銀河団でも見られ、銀河団に共通の描像となっています。ただし、その状況証拠はあっても、実際にはまだ誰もその現場をつかんでいません。XRS の観測によって初めて、銀河団ガスのダイナミックな運動を直接捕らえることができるのです。

図 3(b) が XRS で Abell 3667 を観測した場合に予想されるヘリウム様 (24 階電離) の鉄の K 輝線スペクトルです。黒色が中心部、青色が東南部からのスペクトルで、視線方向の相対速度が約 700 km s^{-1} あった場合を仮定しています。エネルギー単位の違いによっていくつかの輝線に分離されますが、一番強く高いエネルギーの輝線が共鳴線です。この共鳴線を使って、東南部のガスが相対的に動いていることによって生じるドップラー偏移をはっきりと検出することができます。その輝線の中心エネルギーのずれを測ることにより、ガスの運動速度を 100 km s^{-1} 以下の精度で知ることができます。さらに、輝線幅からガス全体が一様に同じ速度で動いているのかどうか、輝線強度からはこの運動に伴ってどの程度の量の重元素が移動しているがわかります。従来の静止画から、こうした「動画」を捕らえることにより、銀河や銀河団がどのような力学的過程を経て今の姿に至ったのか、さらには宇宙全体がどのように進化してきたのかを探る手がかりとなります。

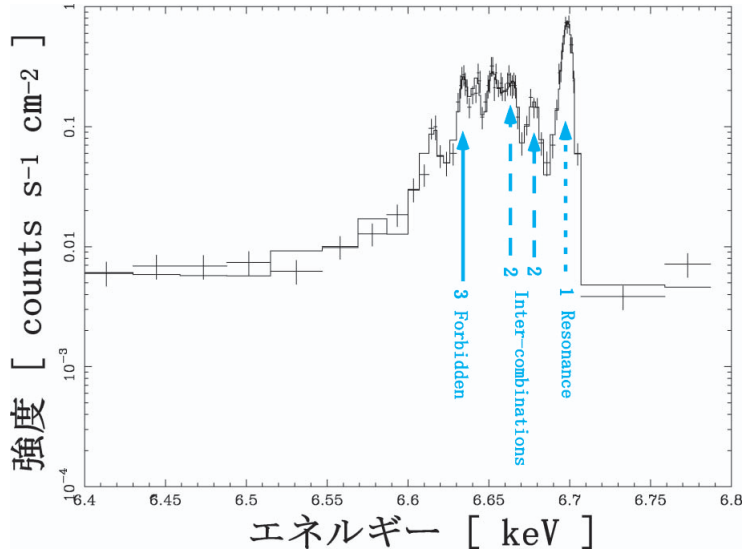


図 4 超新星残骸候補 Sgr A East の XRS スペクトルのシミュレーション。

3.2 超新星残骸

宇宙に存在する重元素は、ほとんどが超新星爆発の際に進む核融合反応で生成されます。爆発物質はやがて広い星間空間へと拡散されていき超新星残骸と呼ばれる天体になります。よって超新星残骸を観測することによってどれだけの重元素が爆発の際に作られ、どのようにまき散らされていくかを探ることができます。そのプロセスの理解は宇宙の化学進化解明への礎となるものです。XRS の高いエネルギー分解能は、いままでは測定が難しかったニッケルやクロムなどの希少な元素を含めて、爆風中に存在する重元素に伴う輝線を捕らえることと期待されています。また、 100 km s^{-1} 程度のイオンの動きを捕らえることができ、今までより 1 桁以上古い、数千歳の超新星残骸の爆風の動きまで捕らえることができます。

図 4 は銀河系中心のごく近傍に存在する超新星残骸候補 Sgr A East から期待される XRS スペクトルのシミュレーションです。図中の各矢印はヘリウム様の鉄イオンから発せられる K 輝線で、一番強度の強い輝線が共鳴線 (resonance) です。一方、禁制線 (forbidden) も見えます。各輝線の

強度比からプラズマの温度や年齢に強い制限をつけることができます。

超新星の爆風は周りの星間物質と衝突して衝撃波を発生します。X 線を発するような高温プラズマはこの衝撃波によって加熱されてできたものです。衝撃波自体は宇宙の至る所で発生していると考えられていますが、超新星残骸は中でも最も素性のよい実験場です。したがって、宇宙物理学の素過程である衝撃波加熱や粒子加速などの検証を目指した観測も、超新星残骸を使って Astro-E2 で盛んに行われることでしょう。

4. 観測提案について

4.1 公募概要

今回の公募 (AO-1) は、2005 年 9 月より 1 年間の観測を対象としており、全世界の研究者に開かれています。この期間の全観測時間は、姿勢制御・衛星の保守・装置の較正などの時間 (Observatory Time) 5%、および緊急的な観測 (TOO = Target of Opportunity) のための時間として 3% を確保した残りの実観測時間を、(1) Astro-E2 SWG が 25%、(2) 日本観測時間 37.5%、(3) 米

国側観測時間 32.5%，(4) 日米共同観測時間 5%，の割合で配分することになっています。このうち、日米共同枠は、同じ天体について独立な提案が日米で提案された場合、両提案者が共同観測を希望するなら、この枠に取り込みます。また日本側観測時間の中から 6% を、日欧共同観測として ESA からの観測提案に割り当てます。したがって純粋な日本観測時間は 31.5%，1 日に可能な実観測時間を 37 キロ秒とすると、1 年間で約 3,900 キロ秒になります。さらに、日本・米国・ESA 以外の国の研究者からの提案も日本枠に提案できますが、ESA 枠を越えない範囲とすることになっています。

採用された提案に基づく観測データは、基本処理を済ませたデータを提案者が取得可能になった後、1 年間の占有期間があります。占有期間が過ぎたあとはアーカイブデータとして全世界に公開されます。

4.2 観測提案の手引き

ここで、観測時間を獲得するために、観測提案にぜひとも書いておくべき事柄をまとめておきましょう。まず、Astro-E2 の観測装置がその研究に

最も適していると示すことが重要です。特に、Astro-E2 の大きな特長である XRS の冷媒に寿命（約 2.5 年）があるため、冷媒がある間は XRS を必要とする科学的目的が優先されます。XRS を大いに活かすアイデアが採択の鍵となります。次に、その目的が Astro-E2 による観測で達成できるかどうか、観測可能性が示されていることが重要です。提案する観測時間の長さについては、目的とするサイエンスに必要な光子統計を考慮して、十分な理由づけを提案書に明記して下さい。この観測可能性を調べるために、いくつかのソフトウェアが用意されていますので、目的に応じて利用して下さい。手に入れる方法や使用例などは技術資料にありますので参照して下さい。

詳しい応募方法などは Astro-E2 ホームページにありますのでご覧ください。AO-1 の締切は 8 月 18 日（水）です。皆様のご応募をお待ちしております。

参考文献

- 1) Vikhlinin, et al., 2001, ApJ 551, 160