

打ちあげ迫る XRISM

JAXA 宇宙科学研究所

山崎 典子

yamasaki@astro.isas.jaxa.jp

2023 年 (令和 5 年) 2 月 2 日

1 X 線分光撮像衛星 XRISM

X 線分光撮像衛星 XRISM (X-ray Imaging and Spectroscopy Mission)¹は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) が 2023 年度に打ちあげ予定の天文観測衛星である [1]。宇宙機による X 線天文学は、高エネルギーニュースではあまり掲載されたことがないので、少し周辺情報も含め紹介させていただく。皆様の参考になれば幸いです。

XRISM 衛星の重さは約 2.3 t で、打ちあげ後の太陽電池パドル展開後のイメージが図 1 のようになる。種子島宇宙センターより、月着陸実証機 SLIM と同時に HII-A ロケットにより打ちあげられ、先に分離、軌道傾斜角約 31 度、高度約 550 km のほぼ円軌道に投入される。軌道周期は 96 分の予定で、主な受信局となる鹿児島県大隅半島の内之浦宇宙空間観測所で、一日に 5 回 × 10 分程度の通信が可能となる。受信バンドは X-band (9 GHz 帯) および S-band (3 GHz 帯) で、ダウンリンク速度は 4 Mbps, 1 受信あたり 2 Gbit (256 MB) 程度と、現在の高エネルギー物理の中では非常にささやかな装置である。観測期間は 3 年とされているが、これについては後述する。

観測装置としては、多層薄膜を用いた焦点距離 5.6 m の 2 回反射型 X 線望遠鏡 (光学系としては Wolter-I type) に、検出器としてエネルギー分解能 7 eV 以下の X 線マイクロカロリメータ Resolve と視野の広い X 線 CCD カメラ Xtend の 2 種類を持つ。XRISM は 2016 年に打ちあげられ、軌道上の不具合により喪失した「ひとみ」(Astro-H) 衛星の後継機として 2018 年より開発が行われたが、「ひとみ」に搭載されていた硬 X 線撮像望遠鏡および検出器、軟 X 線検出器は XRISM には用いられず、0.3–12 keV の X 線領域での撮像と分光に特化している。「ひとみ」搭載 SXS は、人工衛星として始めてマイクロカロリメータによる天体観測を短い期間行なったが、Resolve はそれを再現し、本格的な観測を行なうも

のである。2 種の検出器の特徴を表 1 にまとめる。開発は、日本国内の多くの大学と、米国 NASA/GSFC, オランダ SRON 等の協力により進められている。

2 X 線天文学と分光撮像

ここまで何度かでてきた、「分光撮像」とは何か、なぜ X 線天文学ではそれが重視されるか、について簡単に述べておきたい。宇宙からくる光子について、それが空のどの位置からきたか、またそのエネルギー (波長) はいくらであるか、を同時に測定するのが分光撮像である。当たり前ではないか、と思われるかもしれないが、案外そうでもない。例えば可視光望遠鏡では、「撮像」と「分光」を同時に行なわないことが多い。イメージをとる際に、ある波長の光を通すフィルターを用い、フィルタを変えた複数のイメージから天体の「色」を見る。詳細なスペクトルをとる際には焦点面上のイメージからファイバーなどで光を取り出し、回折格子などで波長ごとに光を分散させて記録する。X 線では撮像ではなくコリメータで視野を絞っての測光や、視野中心の光をわけて回折格子でスペクトルを取ることも行われるが、1990 年代以降では分光撮像が主流となっている。空からくる X 線光子の 1 つ 1 つに対し、エネルギー、焦点面上の距離、到来時刻を測定し、記録する。X 線 CCD カメラでの測定でも、数秒程度の露光時間後にピクセルをシリーズに読み出し、フラックスを測るのではなく、1 光子での光電吸収による電子雲の広がり程度の “event” を定義し、電荷量からエネルギーを決定する。この場合、CCD の 1 つのピクセルには露光時間の間に 2 つの光子はやってこないことを前提としている。X 線天文学で使われる検出器は、非常にフラックスが小さい X 線に対する分光撮像に特化してきたという特徴がある。²

この理由としては、X 線天文学の観測対象には「本質的に広がっている放射」が含まれること、また黒体放

¹<https://xrism.isas.jaxa.jp>

²「かに星雲」など由緒ある明るい天体を観測する際には特殊モードが必要となってしまったケースが多く、較正には苦勞する。それより 3 桁小さいあたりがメイン、6 桁小さいあたりが最前線。



図 1: XRISM 衛星のイメージ (CG 図) ©宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

表 1: XRISM に搭載される検出器

性能	Resolve	Xtend
種別	マイクロカロリメータ	X 線 CCD
ピクセルフォーマット	6 × 6	1280 × 1280
視野	2.9 分角	22 分角
角度分解能	1.7 分以下	1.7 分以下
有効面積 (6 keV)	210 cm ² 以上	300 cm ² 以上
エネルギー帯域	0.3–12 keV	0.4 – 12 keV
エネルギー分解能	7 eV 以下	250 eV 以下

射のような、のっぺりとして予想しやすいスペクトルの天体は少ないことが上げられる。例えば超新星残骸は爆発後どんどん大きく膨らむプラズマの塊で、数 10pc 程度の領域まで明るく輝く。地球から見た場合、SN 1006 (明月記に書かれていた超新星) は、今では 30 分角 (満月) 程度の大きさであり、平行光を想定した回折光子では波長分解能を発揮することができない。

XRISM で掲げているサイエンステーマは、宇宙の高温プラズマにおける物質循環・エネルギー輸送過程と天体の進化の解明を進めることであり具体的には

1. 宇宙の構造形成と銀河団の進化
2. 宇宙の物質循環の歴史
3. 宇宙のエネルギー輸送と循環

の 3 つを掲げている。これらはすべて分光撮像が大きな力を発揮するテーマである。

宇宙背景放射の温度は 2.7 K だが、宇宙にある物質の温度はそれと同じではない。暗黒物質や通常物質は、重力によって集まり、その位置エネルギーを開放すること

で物質の「温度」は上がっていく。そのため、通常物質 (暗黒物質ではないバリオン) のうち現在銀河周辺で星や冷たい星間物質になっているのは、宇宙全体では 10–20% 程度と考えられる。残りは銀河間空間で光電離あるいは衝突電離されたプラズマ状態にあり、その多くが X 線を放射している。例えば我々の銀河に暗黒物質が存在する簡単な証拠として、銀河円盤の回転速度が外側にいっても ~ 200 km/s と一定であることは良く知られている。すると陽子の平均エネルギーは $\frac{1}{2}m_p v^2 \sim 0.2$ keV となる。星や冷たい星間物質も存在するが、X 線でみると銀河は $kT \sim 0.2$ keV のハローで満たされている。さらに重たい重力的に束縛された系として、銀河が集まった銀河群 (\sim 数 10 個程度) や銀河団 (≤ 1000 個程度) があり、宇宙の大構造を形成している。これらは、可視光で見ると半径 2 Mpc³ の範囲に 10 kpc 程度の銀河が点々と浮いている。しかし X 線でみると銀河間空間もプラズマの塊であり、銀河の速度分散 ~ 1000 km/s に対応するように、温度は $kT \sim 1–10$ keV に相当し、銀河間物質の質量は星の数 10 倍となる。これを調べることで、銀河団を通

³1 Mpc = 3.09×10^{22} m

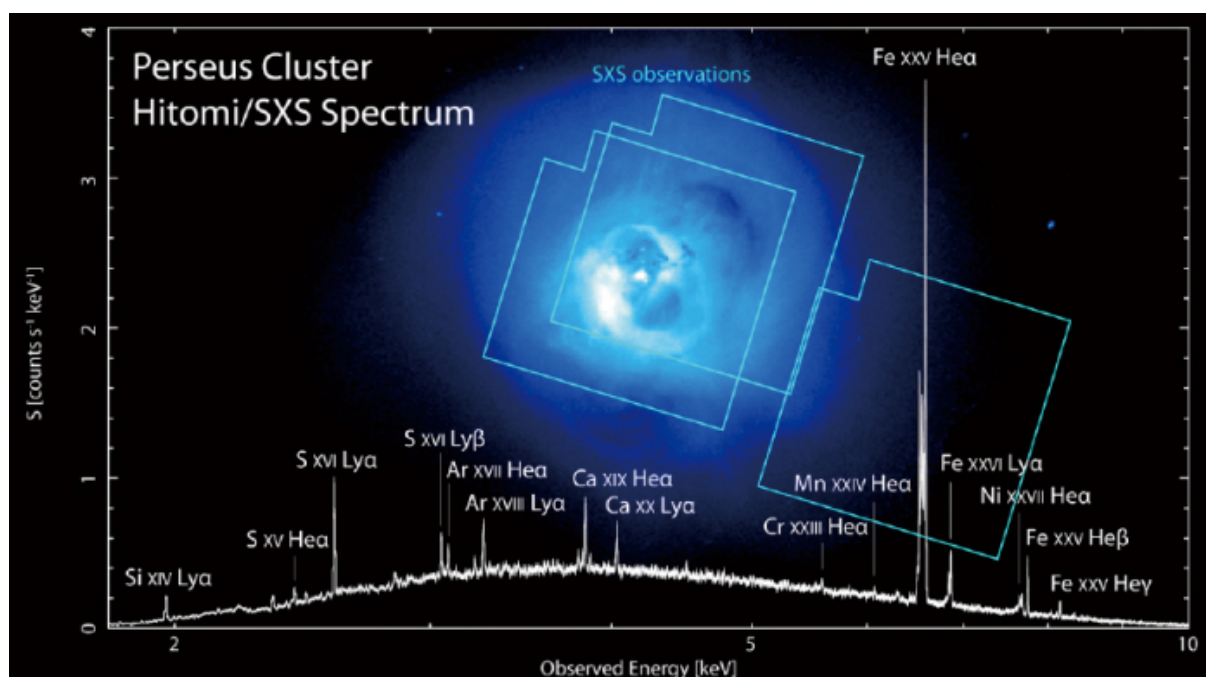


図 2: 「ひとみ」で取得したペルセウス座銀河団のエネルギースペクトル, イメージは Chandra 衛星で取得した X 線イメージに「ひとみ」SXS の視野を重ねたもの (PASJ, Vol.70, No.2 表紙画像より)

じ宇宙の大規模構造形成史を探ることが XRISM のテーマの 1 つである。このプラズマ (Intra-cluster medium: ICM) を観測し温度と密度を決め、圧力が重力ポテンシャルと静水圧平衡にあると仮定して物質分布を求めると、星 + ICM の量の 10 倍程度 ($10^{14-15} M_{\odot}$ ⁴) あり、暗黒物質が重力を担っていると見なせる。ICM は典型的には 10^{38} J/s と X 線では非常に明るい、銀河団という重力的に束縛された天体になるには、宇宙の平均密度の 200 倍程度でよい、 $\rho = 10^{-3 \sim -6} \text{ cm}^{-3}$ と地上実験では作れないほど非常に希薄なプラズマである。そのため放射スペクトルは、Maxwell 分布に従う電子からの制動放射と、電子と電離平衡になった各種イオンからの輝線放射が、ほぼ自己吸収なしに観測される (optically-thin collisional-ionized plasma emission) と想定される。輝線を分光して強度を知ること、プラズマ温度や化学組成を調べることができる。「各種」イオンというのは、宇宙にあるバリオンの大多数を占める H, He 以外の元素をさす。天文学では Li 以上の原子は重元素 (時には「金属」と呼ばれるが、太陽中でも H との数の比として C, N, O は 10^{-4} オーダー、Fe, Mg, Si, S は 10^{-5} オーダーであり、ppm よりも多い程度の微量分析を行ない、元素の絶対量、空間分布や元素比から起源を探ることが行われている。

図 2 に「ひとみ」衛星 SXS で取得したペルセウス座銀河団中心部のエネルギースペクトルを示す [2]。これは測定データの横軸をエネルギー換算しただけであり、

⁴ $1M_{\odot}$ は太陽質量で 2×10^{30} kg

自然幅を含む放射スペクトルに検出器レスポンスを重ねたものである。また初期立ち上げ期間中で、Be 窓が閉じているために 2 keV 以下の観測効率が非常に低いが、エネルギー分解能としては XRISM/Resolve でもほぼ同じ性能 (5 eV 目標, 7 eV 要求) を期待している。ペルセウス座銀河団は、我々から約 75 Mpc という近傍にあり、比較的溫度も高い ($kT \sim 5$ keV) 銀河団であるため、X 線では全天一明るい天体であり、またちよつと潰れた形で約 3 度角に広がって見える。「ひとみ」SXS で観測したのはその中心部約 100 kpc 程度の小さな領域であるが、そのスペクトルは圧巻であった。多くの論文がでていて、詳細はそちらを参照していただきたいが、CCD では一本であった Fe XXV (= Fe^{24+} , つまり電子が 2 個残った He 様鉄⁵) の $n = 2 \rightarrow 1$ の蛍光輝線が、2 電子の軌道角運動量によって 4 つの微細構造に分離している。そのため遷移確率による自然幅、熱運動による速度幅に加え、それ以外のプラズマ内乱流速度 (187 ± 13 km/s) があることがわかった。さきほど、銀河団放射は自己吸収されない、と書いたが、蛍光輝線がイオンの同じエネルギー準位によって散乱される共鳴散乱の光学的厚みはイオンの相対速度の指標となりうる。観測された共鳴散乱強度も輝線幅と矛盾しない [3]。乱流による圧力は、ガス圧の 4% 程度に過ぎず、静水圧平衡を仮定した重力ポテンシャル推定へのバイアスは比較的小さい。このような内部での乱流や、非熱的エネルギー・圧力は銀河団への物質集積過程における内部の熱化過程や、大

⁵中性元素を I、一価イオンを II と書く天文学の慣習

質量ブラックホールによるジェットや超新星爆発などの天体現象からのエネルギー供給などを反映する。また、ICMの化学組成では、エネルギー分解能の向上によりAr, Cr, Caのような微量元素まではつきり定量できるが、これらは超新星で生成され、銀河から銀河間空間に放出されたものである。このように分光撮像から構造形成、化学進化、エネルギー循環に多くの新しい事実が得られる。

影響は宇宙物理学に留まらない。例えば図3は、データと各種放射モデルを比較したものであり、これらに基づいてデータベースに含まれる準位やその遷移確率など更新が行われている。XRISMによって、さらに多くの天体、様々な温度の放射スペクトルが観測され、アップデートが進むことが期待される。共鳴散乱のようなものまで本当に観測されてしまうので、思い付く素過程は、Resolvedでの検出可能性を一旦は考えてみるべきで、識者のアイデアをお待ちしたい。

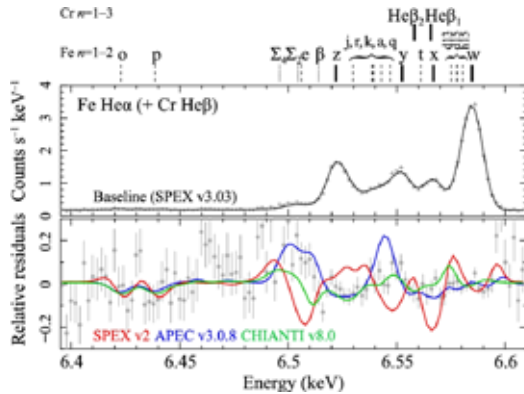


図3: ペルセウス座銀河団で観測された Fe^{24+} の $K\alpha$ 輝線と各種放射モデルの比較 [4]

3 New Physics ?

さて、上記のようにXRISMでプラズマ放射モデルの構築がさらに進んだとして、それでも理解できないものがあつたら? そこにNew Physicsはあるのか? というのも大きな期待の1つである。X線CCDカメラを利用したXMM-Newton衛星による銀河団に観測で、3.55–3.57 keV付近に説明できない輝線構造があり、7.1 keV sterile ν の崩壊ではないか [5] という可能性が指摘された直後から、それはCa, K, Arの輝線の混入ではないか、検出器のレスポンスだ、と様々な議論が巻き起こった。日本の「すざく」衛星はXMM-Newtonよりは多少エネルギー分解能がよく、かなりバックグラウンドが低い。これを利用した銀河団や背景放射の観測から、この“3.5 keV sterile ν ”についてはかなり否定的な見解

が多い⁶。当然のことながら、「ひとみ」でもこの検証がなされた [6]。図4に放射モデルによるデータ再現とその残差を示すが、優位な構造は見つかっていない。さらに暗黒物質も銀河団のポテンシャル同様の速度分散を持つ場合、などを仮定した検証や、よりエネルギー範囲を広げた検証が行われている。

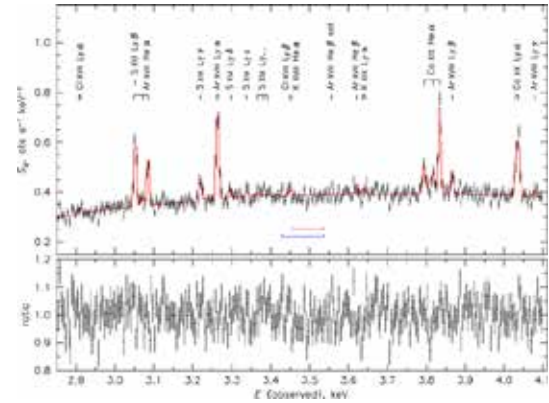


図4: 「ひとみ」によるペルセウス座銀河団観測データの熱的放射による再現と残差 [6]。3.5 keV付近には目立った構造はない

天文学的には暗黒物質があるのはほぼ自明であるのにその対応粒子は見つからず、一方で詳細化する観測は暗黒物質に期待される相互作用などの条件を次第に狭めていく、という現在のジレンマを解決するためにも、暗黒物質あるいは未知の粒子/現象の探索はこれからも続くだろう。「ひとみ」ではごく限られた天体、時間しか観測が行われなかったが、XRISMではより可能性は広がる。エネルギー分解能が悪くても、視野を広く、統計をあげれば検出感度をあげることはできるが、先に述べたような放射モデルの検証まで含めた系統誤差の低減ができることが、カロリメータ観測の強みである。sterile ν にこだわる必要はなく、全般的に崩壊輝線探索は可能である。暗黒物質の視線方向での集積度が高い銀河団や、背景放射の利用以外にも 10^9 Tの磁場をもつ中性子星や、ブラックホール近傍、あるいは γ 線バーストや重力波天体など特殊な条件での放射過程など、様々なチャンネルが探索可能であり、アイデア募集中である。何かあれば是非ご連絡いただきたい。

また、マイクロカロリメータは、4節で示すように熱を検知するため、粒子によらず優れたエネルギー分解能を発揮し、地上実験への応用も近年始まっている。 γ 線輝線の高感度検出、様々な手法での暗黒物質探索、エキゾチック原子からのX線分光、電子顕微鏡のX線分光装置への利用など、様々な事例がある。時定数が熱化で決っているために高カウントレートが難しいという事情はあるが、他にも応用の道はあるものと期待している。

⁶元論文著者はそうでもないで論争は続いている

4 カロリメータ検出器 Resolve に使われる技術

XRISM の Resolve 検出器は 50 mK で動作するマイクロカロリメータである。現在研究の主流となりつつある TES 型ではなく、イオン注入型 Si を温度計としたものである (図 5)。Resolve のシステムダイアグラムを図 6 に示す。検出器および断熱消磁冷凍機は米国 NASA/GSFC, He タンクおよび機械式冷凍機による冷却系, 信号処理系や低ノイズ電源分配器を日本 (JAXA および国内大学), 入射強度コントロールと較正 X 線照射を行なう Filter wheel/MXS (Modulated X-ray Source) をオランダ SRON が担当している。全体及び現状については参考文献 [7, 8] および現在準備中のレビュー [9], また「ひとみ」の結果や設計も含めた論文も多数ある (例 [10])。また冷却系についても概要 [12] や「ひとみ」の多くの検証結果 (例 [13]) が示されているので, 参照いただきたい。

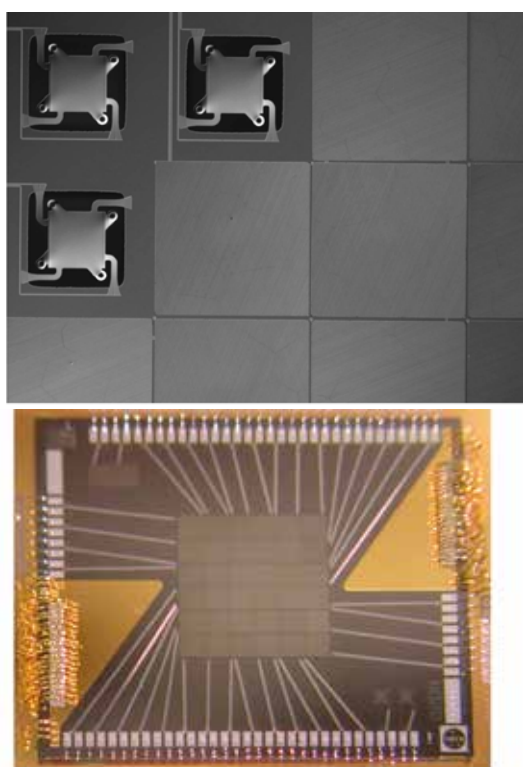


図 5: 上:「ひとみ」SXS の温度計と吸収体。下:配線後のアレイ, 右上, 左下の三角は金のヒートシンクで, 基板の外とボンディングしてある [10]。Resolve のものもほぼ同じである。

マイクロカロリメータは, 低温で物質の比熱が小さくなることを利用し, 光子 1 つのエネルギーを熱に変えて検出を行なう。Resolve 検出器は 1 pixel がほぼ 0.5 分角に相当する $832 \mu\text{m}$ ピッチの 6×6 アレイで, 35 pixel を

読み出している (1 pixel は視野外の較正用)。比熱が小さく, 熱伝導のよい半金属 HgTe を厚さ $10 \mu\text{m}$ の吸収体として用い⁷, バス温度 50 mK での動作時の熱容量は 0.06 pJ/K 程度であり, 1 keV のエネルギーで $\sim 2 \text{ mK}$ の温度上昇をする。Si 温度計の抵抗値は $30 \text{ M}\Omega$ 程度であり, バイアスにより動作温度は 10 mK 程度高い。その抵抗変化を 130 K 程度で動作させている JFET で読み出している。HgTe 吸収体の吸収効率は 6 keV で 95% 以上であり, 有効面積は X 線反射鏡の有効面積と低エネルギー側では入射窓にある 5 層のフィルタによる吸収で決っている。カロリメータの原理的なノイズは, 系のもつ phonon のゆらぎ ($\sigma^2 = k_B T^2 C$, T, C は系の温度と熱容量) であり, thermal dynamic noise (TFN) と呼ばれる。Resolve の場合は 3.8 eV (FWHM 6 keV) 程度であるが, それにバス温度のゆらぎその他が付け加わる。究極の分解能に近づけるために, 読み出した信号は, ピークホールド回路などは介さず, event ごとに波形そのものを一旦記録する。平均的なパルス波形とノイズとの周波数空間での比から重みをつけたフィルタを各ピクセルごとに作り, それを時空間に戻したものを “Template” として, 波形データと比較することで波高値を決定する「最適フィルタ処理」を行なっている。信号配線は, 基本的には比較的抵抗の大きい (熱伝導の悪い) ツイストペアを用いているが, 図 6 にある各機器間でのグラウンドループ⁸を避け, また回路のクロックを同期しておく, など様々な工夫がされている。エネルギー較正は, 打ちあげ前に地上で多くの輝線を用いて行ない, 軌道上では ^{55}Fe 線源の他, UV LED でフォトカソードをパルスのに叩き, 加速した電子をターゲットにあてる較正用線源 MXS を用いる。LED のタイミングと Resolve 信号の同期をとることで, 観測への影響をほぼ無くすることができる [11]。

Resolve の大きな特徴が, 50 mK での検出器動作を可能とする冷却系である。図 7 に冷却系のブロックダイアグラムとデュワーの写真を示す。デュワーの直径は 950 mm, 重さは 270 kg である。断熱消磁冷凍機 (Adiabatic Demagnetization Refrigerator: ADR) は磁性体を外界と熱接触させた状態で超伝導コイルで磁場をかけ, スピンを揃えてから熱伝導を切って磁場を下げ, スピンのエントロピーを利用して冷却を行なう。Resolve ではクロムミョウバン (CPA) とフッ化ガドリニウム-リチウム (GLF) などを用い, 4 K から 50 mK に段階的に冷す 3 段構成になっている。低温側の 2 段 ADR を, 約 1 日 1 回, 1 時間程度の再磁化することで 50 mK を維持する。ADR の排熱は, 液体ヘリウムに捨てられる。液体ヘリウムは軌道上では減圧され約 1.2 K の超流動状態である。液体ヘリウムは 2 段スターリング (2ST) と

⁷貼り付けは手作業

⁸当たり前だが衛星上には “アース” がない

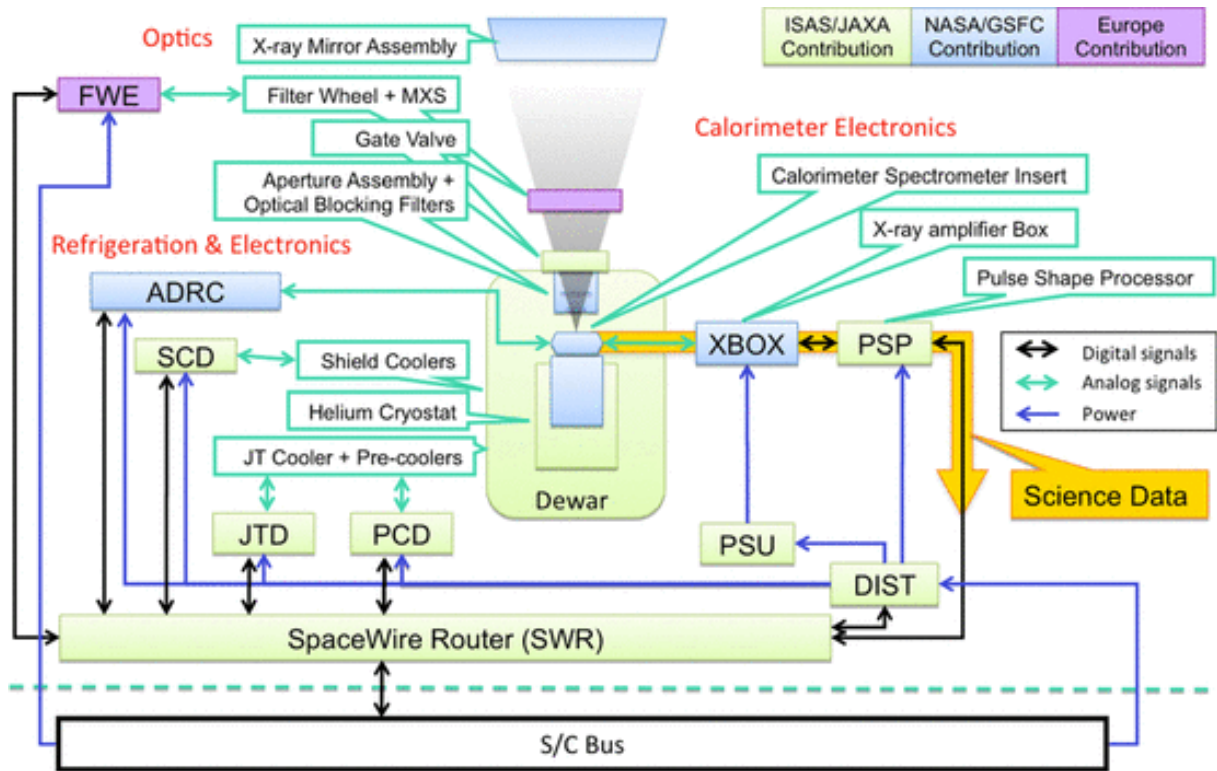


図 6: Resolve のシステムダイアグラム [8]

ジュールトムソン (JT) の 2 種の機械式冷凍機による 4.5 K のシールドに囲まれ、熱流入を小さくしているため、蒸発量は非常に小さい。「ひとみ」の軌道上データから、蒸発量は 0.024 L/day であり、30 L の液体ヘリウムでも蒸発まで 3 年以上を要する⁹。これが、XRISM のノミナル軌道寿命を決める要素である。しかし、冷媒で寿命が決まるのでは勿体ない、は誰しも考えるところであり、また Astro-E2 の失敗からもそのような要請があった。ADR の 3 段目はヘリウムと機能冗長になっており、ヘリウム蒸発後も冷凍機が健全であれば観測を続けることができる。ミッションとしての 3 年間の運用終了後には、衛星の状態に対応して延長運用を申請、継続していくだろう。このように cryogen free mode と液体ヘリウムを併用するのは、技術の過渡期ならでのことだが、他に例をみないシステムとなった。熱流入を最小にする設計の結果、液体ヘリウムの寿命を延ばし、機械式冷凍機だけの運転も可能となったといえる。そのためには、ADR 動作に必須であるヒートスイッチの ON/OFF による熱伝導率変化の切れ味のよさ、デューワー内部の MLI (Multi Layer Insulator) の輻射熱遮断性能、マグネット用の超伝導配線による熱流入の削減など、様々な断熱技術が使われている。これらは、波長を問わず将来の高感度宇宙観測のための低温技術として共通のものである。冷却系への要求としては、冷却能力以外に温度安定

⁹典型的には実験室のヘリウム容器での蒸発量は 0.5L/day 程度

度も重要で、要求値は rms で 2.5 μ K 以下と非常に厳しい。「ひとみ」の軌道上データでは、地球に近傍における宇宙線バックグラウンドの大きい SAA (South Atlantic Anomaly) を除くと < 2 μ K を達成している [13]。検出器アレイの下には、Anti-coincidence 検出器が設置され、宇宙線バックグラウンドを落とすことができる。カウントレートやスペクトルは GEANT4 のシミュレーションでもよく再現されている。しかし、SAA を通過する 15 分程度の間は、温度安定度が非常に悪くなる。ADR は温度を安定化させるように超伝導マグネットの電流をゆっくりと下げていくのだが、検出器ステージだけでなく、磁性体や制御ループの中の温度計に宇宙線由来の熱負荷が入り、過剰な制御をするらしく、数秒程度での温度のふれが観測される。平均的に宇宙線が 20-30 nW の熱負荷となっている。このような時間帯はエネルギー分解能も悪く、解析には使用できない。どのような擾乱も最終的に熱として負荷になると性能に影響を与えるため、機械式冷凍機による振動の防振など様々な工夫を行なっている。

5 今後の予定など

2023 年 2 月現在、打ちあげの日程は公表されていないが、打ちあげ後当初 3 ヶ月は機器立ち上げ、機能確認などの commissioning、3-10 ヶ月は初期観測 (Performance

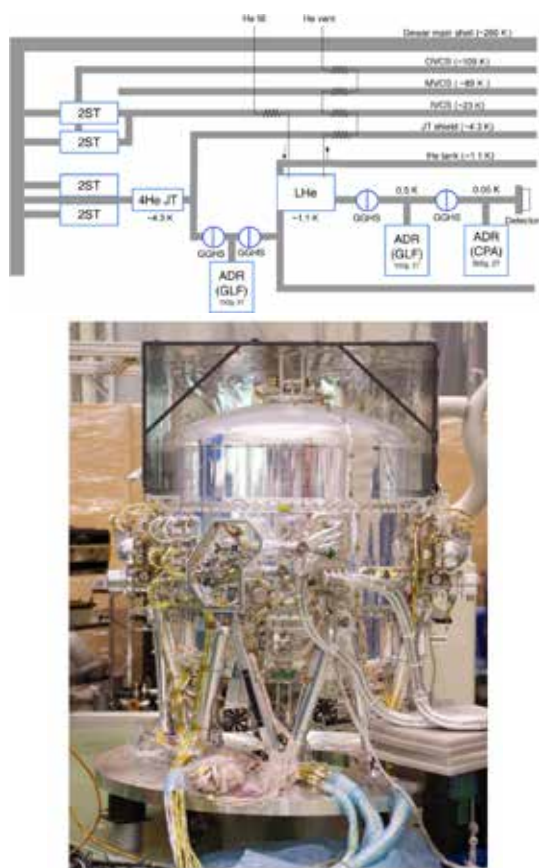


図 7: Resolve 冷却系のブロックダイアグラムと実際のデュワー [12]

Verification + Calibration), その後は12ヶ月を1 cycle として公募観測を行なう。

観測データは、衛星からの生データに対し、パイプラインプロセスを経て較正が行われたのちに、FITS形式で提供される。基本的には観測者にデータが渡ってから12ヶ月で公開され、日米のアーカイブセンターから取得可能となる。また較正データベースを含む解析ツールも公開される。初期観測は、XRISM チームメンバおよび昨年公募されたゲストサイエンティストにより優先的に解析されるが、打ちあげ後3ヶ月で一部のデータは先行公開され、観測応募の助けとする。公募観測は1年ごとに行われるが、1年間の観測時間は約12 Msec、日本は48%の権利をもち、国内の研究者(含む大学院生)が応募可能である。また、Director's time を用いた突発天体観測へのリクエスト(Time of Opportunity 観測)も可能とする。このように、観測やデータアクセスの機会をなるべく広げた公開天文台としての運用を予定している。初期観測天体については、いずれも有名天体だがリストを表2に載せる。この選定の過程で検討したサイエンスは、XRISM white paper として公表している [14] が、それ以外にも、是非どのようなデータが期待できるか、ここに載っていないもので観測できるものは何か、

など考えてみていただきたい。XRISMによる分光撮像は、新しい情報を我々にもたらすが、それで全てがわかるわけではもちろんない。2030年代には、より大面積のAthena衛星なども計画されているがさらに次世代に何が必要か、考えるべき時期にきている。

XRISMの打ちあげがいよいよ近づいてきた。チームの努力はもちろんだが、「ひとみ」の失敗からの再挑戦を支えて下さった多くの方々に感謝申し上げる。本稿はチームではなく、筆者に文責があることを申し述べておく。

参考文献

- [1] M. Tashiro *J. of Modern Physics D* **31**, 2, 2230001 (2022)
- [2] Hitomi Collaboration, *Nature* **535**, 117 (2016)
- [3] Hitomi Collaboration, *Publication of Astronomical Society of Japan* **70(2)**, 10 (2018)
- [4] Hitomi Collaboration, *Publication of Astronomical Society of Japan* **70(2)**, 12 (2018)
- [5] E. Bulbul *et al.*, *Astrophysical Journal* **789**, 13 (2014)
- [6] F. A. Aharonian *et al.*, *Astrophysical Journal Letters* **837**, L15 (2017)
- [7] Y. Ishisaki *et al.*, *SPIE proc.* **12181**, 121811S (2022)
- [8] Y. Ishisaki *et al.*, *Journal of Low Temperature Physics* **193**, pp.991-995 (2018)
- [9] Sato *et al.*, Invited chapter for the edited book *High-Resolution X-Ray Spectroscopy: Instrumentation, Data Analysis, and Science* (Eds. C. Bambi and J. Jiang, Springer Singapore, expected in 2023)
- [10] C. A. Kilbourne *et al.*, *Journal of Telescopes, Instruments and Systems* **4(1)**, 011214 (2018)
- [11] C. P. de Vries *et al.*, *Journal of Telescopes, Instruments and Systems* **4(1)**, 011204 (2017)
- [12] Y. Ezoe *et al.*, *Cryogenics* **108**, 103016 (2020)
- [13] P. J. Shirron *et al.*, *Journal of Telescopes, Instruments and Systems* **4(2)**, 021403 (2018)
- [14] XRISM Science Team, "Science with the X-ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)", arXiv:2003.04962 (2020)

表 2: 初期観測天体リスト

Target	Exposure (ks)	Pri. [†]	Target	Exposure (ks)	Pri. [†]
Galactic Compact Object			3C397	100	C
4U 1916-053	50	A	RCW86 pointing 1	100	C
4U 1624-490	50	A	RCW86 pointing 2	50	C
GX 13+1	30	A	Cyg X-2	240	C
Cyg X-1	100	A	Jupiter	100	C
SS 433	80	A	Carina Nebula	30	C
Cyg X-3	40	A	Extragalactic Compact Object		
Cen X-3	90	A	Centaurus A	100	A
Eta Carinae	100	A	Circinus Galaxy	100	A
V834 Cen	100	A	MCG-6-30-15	100	A
GT Mus	90	A [‡]	NGC 1365 pointing 1	125	A
SS Cygni (flare)	100	A [‡]	NGC 1365 pointing 2	125	A
T Cor Bor	150	A [‡]	NGC 3783	200	A
2S 0921-630	80	C	NGC 4151 pointing 1	45	A
Cir X-1	40	C	NGC 4151 pointing 2	45	A
Vela X-1	70	C	NGC 4151 pointing 3	45	A
SS Cygni (quiescence)	100	C	NGC 4151 pointing 4	45	A
Galactic Diffuse Object			PDS456	150	A
SN1006 pointing 1	20	A	IRASF05189	100	C
SN1006 pointing 2	60	A	M81*	100	C
SN1987A	100	A	Mkn 766	80	C
Cygnus Loop pointing 1	50	A	NGC 4388	100	C
Cygnus Loop pointing 2	30	A	Extragalactic Diffuse Object		
Cygnus Loop pointing 3	20	A	M82	50	A
Tycho SNR pointing 1	75	A	NGC 4636	100	A
Tycho SNR pointing 2	75	A	Perseus Cluster pointing 1	50	A
W49B pointing 1	100	A	Perseus Cluster pointing 2	50	A
W49B pointing 2	100	A	Perseus Cluster pointing 3	80	A
Cas A	50	A	Perseus Cluster pointing 4	100	A
Galactic Center pointing 1	100	A	Virgo Cluster/M87 pointing 1	100	A
Galactic Center pointing 2	100	A	Virgo Cluster/M87 pointing 2	150	A
GX 13+1	60	A	Virgo Cluster/M87 pointing 3	100	A
GX 340+0	150	A	Virgo Cluster/M87 pointing 4	150	A
Comet	100	A	Coma Cluster pointing 1	200	A
SN1006 pointing 3	80	C	Centaurus Cluster	150	A
Galactic Center pointing 3	100	C	Abell 2029 pointing 1	250	A
Cygnus Loop pointing 4	40	C	Abell 2029 pointing 2	50	A
Tycho SNR pointing 3	20	C	Abell 2029 pointing 3	20	A
Tycho SNR pointing 4	20	C	Perseus Cluster pointing 5	200	C
Tycho SNR pointing 5	20	C	Abell 3667	180	C
Tycho SNR pointing 6	20	C	M51	70	C
Tycho SNR pointing 7	20	C	Coma Cluster pointing 2	100	C
Kepler SNR	50	C	NGC 5044	100	C

[†]:Priority “A” targets will be given the highest scheduling priority. Priority “C” targets that are not observed by the end of the PV phase will not be automatically done later in the mission.

[‡]:Reserved “Time of Opportunity” targets, triggered by appointed conditions