

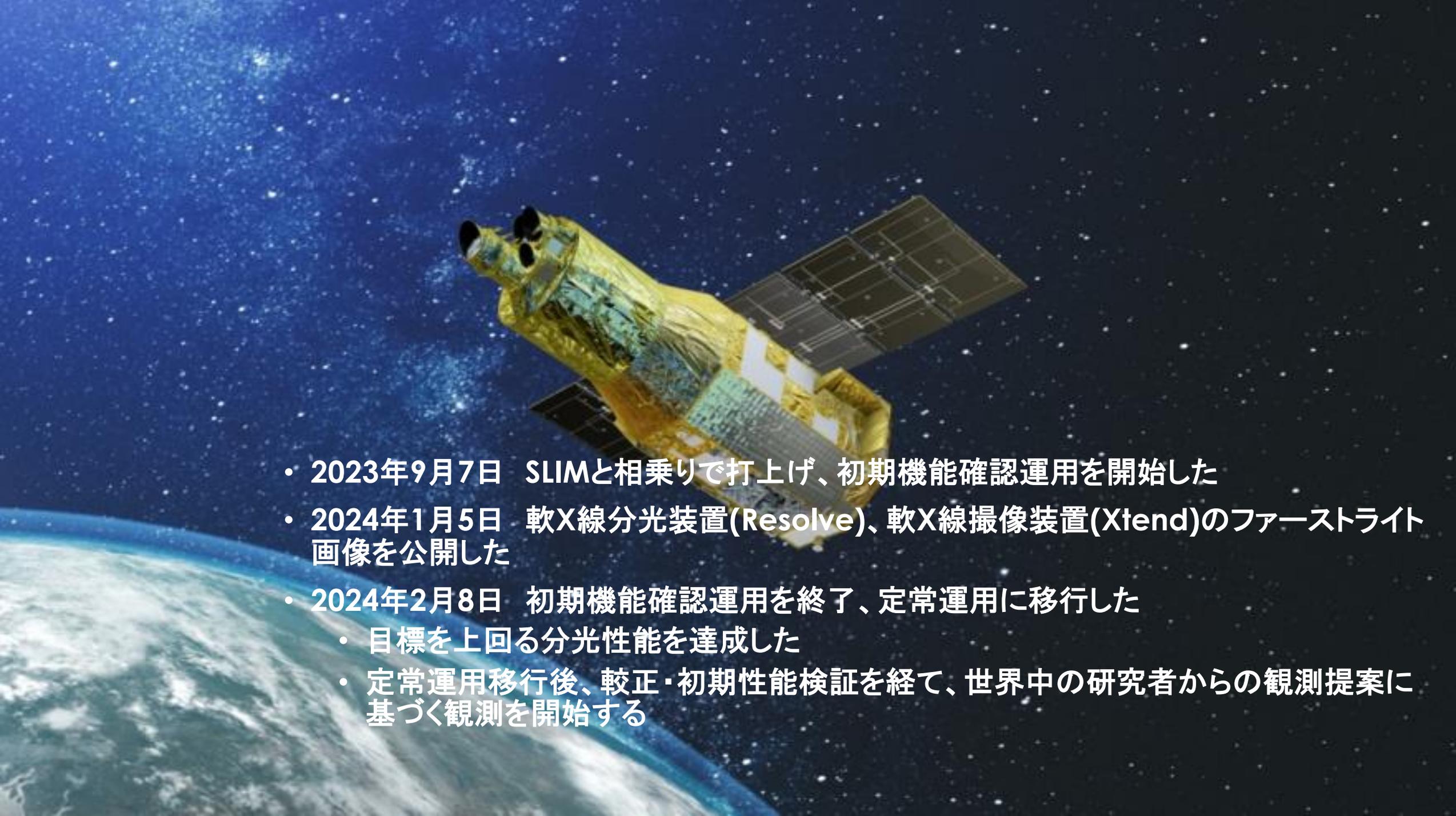
資料85-1

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第85回)2024.4.9

X線分光撮像衛星(XRISM)の 定常運用移行について

2024年4月9日 第85回宇宙開発利用部会

理事/宇宙科学研究所長 國中 均
宇宙科学研究所XRISMプロジェクトチーム
プロジェクトマネージャ 渡辺 伸

- 
- A satellite with a gold-colored cylindrical body and solar panels is shown in space. The Earth's horizon is visible in the lower-left corner against a starry background.
- 2023年9月7日 SLIMと相乗りで打上げ、初期機能確認運用を開始した
 - 2024年1月5日 軟X線分光装置(Resolve)、軟X線撮像装置(Xtend)のファーストライト画像を公開した
 - 2024年2月8日 初期機能確認運用を終了、定常運用に移行した
 - 目標を上回る分光性能を達成した
 - 定常運用移行後、較正・初期性能検証を経て、世界中の研究者からの観測提案に基づく観測を開始する



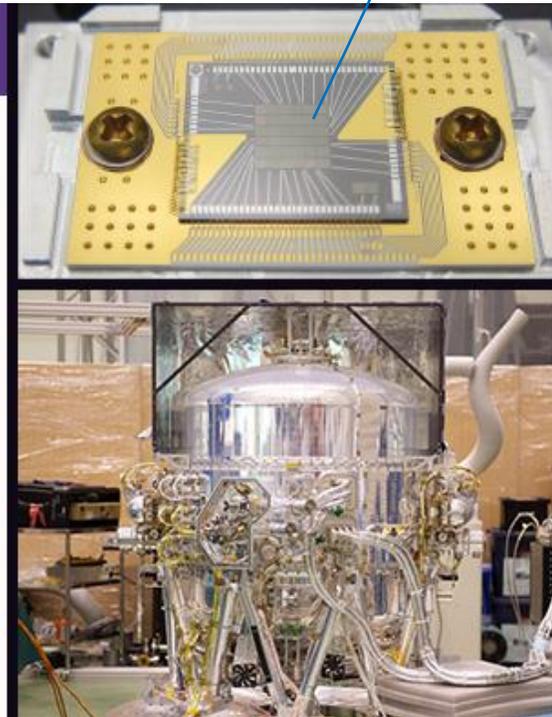
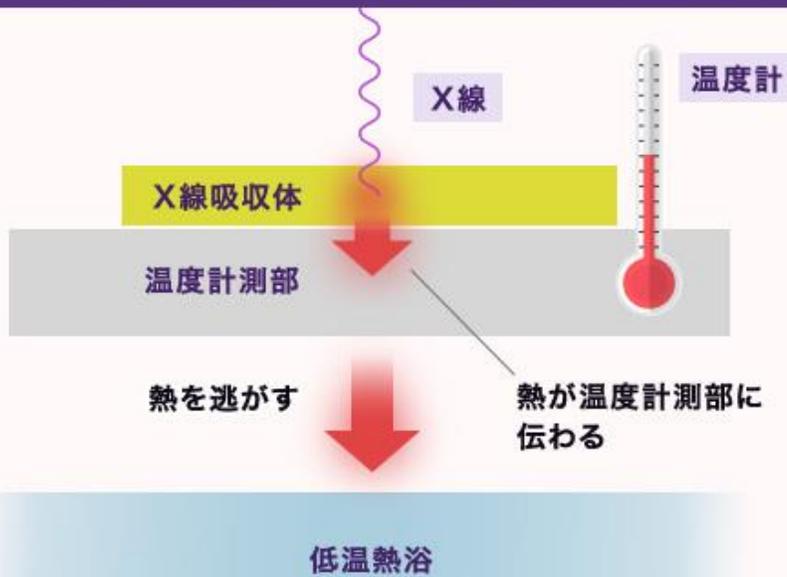
- X線を効率よくセンサ部に集めるX線望遠鏡(XMA)
- 超精密にエネルギーを測る軟X線分光装置(Resolve)
- 広い視野で撮像する軟X線撮像装置(Xtend)

© JAXA

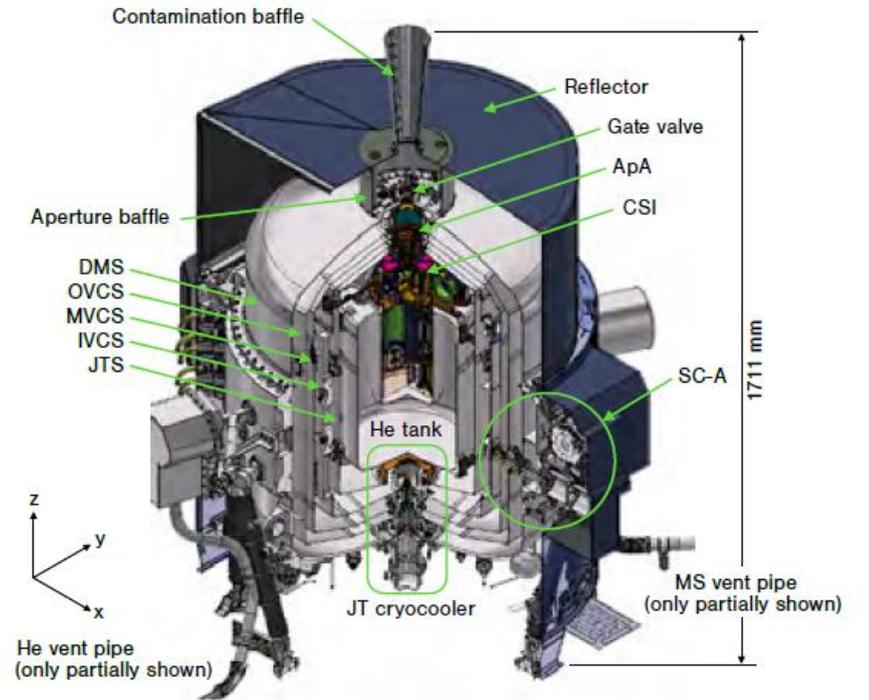
軟X線分光装置(RESOLVE)

- マイクロカロリメータ: 検出器に入射したX線光子1個1個のエネルギーを素子の温度上昇として測定する
- 検出器を **-273.1°C(絶対温度0.05度)**に冷却することで高分解能分光を実現する
- 日米欧の共同開発

X線マイクロカロリメータは、X線を熱に変えて精密測定する



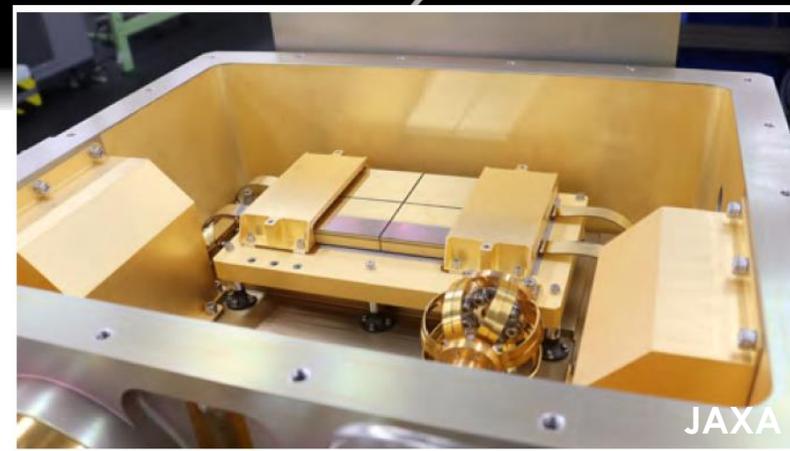
5mm四方検出器
0.02度指向精度要



冷却システム。デュワの多層シールドと多段冷凍機・超流動ヘリウムで検出器(CSI内)を絶対温度0.05度に冷却。 ©JAXA

軟X線撮像装置(XTEND)

- Xtendの検出器は純国産のX線CCDカメラで、軟X線(0.4-13keV)帯で撮像、分光を同時に行う。
- 厚い空乏層、裏面照射型CCDを採用し、従来のX線CCDより高いエネルギーのX線検出、低エネルギーX線に対する高い量子効率を達成した。
- X線望遠鏡としては史上最大の38分角四方の視野をもち満月より広い視野を一度に観測可能。
- 大きく広がった天体の観測で力を発揮する他、Resolve視野外の天体を捉えることでResolveの観測をサポートする。



XtendのCCD素子。銀色の部分が受光面。



衛星搭載前の検査に臨む Xtend。



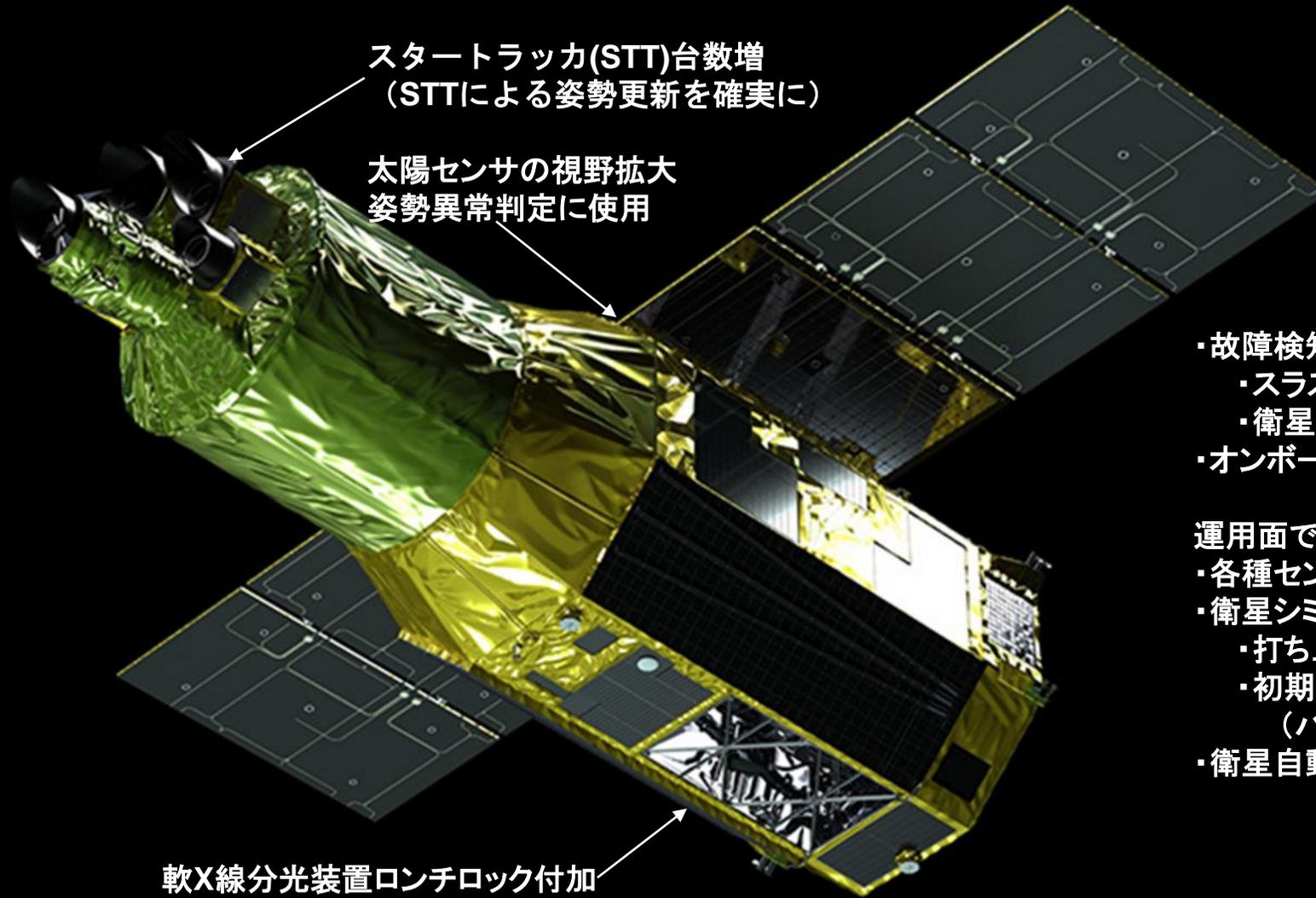
JAXA

衛星バス機器の立上げ、機能確認を完了した

- ✓ GPS受信機機能確認(時刻、軌道決定)
- ✓ データハンドリング系機能確認
- ✓ データレコーダ機能確認
- ✓ 通信系機能確認
- ✓ 姿勢制御系機能確認
 - ✓ スタートラッカ(STT)*
 - ✓ 太陽センサ*
- ✓ 故障検知・分離・再構成機能(FDIR)有効化*
- ✓ 姿勢変更実証
- ✓ 定常姿勢制御モード移行

*ロバスト性向上のためASTRO-Hから設計変更した機器、機能

ASTRO-Hからのロバスト性向上



スタートラッカ(STT)台数増
(STTによる姿勢更新を確実に)

太陽センサの視野拡大
姿勢異常判定に使用

軟X線分光装置ロンチロック付加

- ・故障検知・分離・再構成機能(FDIR)の強化
 - ・スラスタ噴射異常対策
 - ・衛星システムレベルで日照での発生電力監視
- ・オンボードでのパラメータ有効性チェック

運用面では、

- ・各種センサの機能性能確認後、FDIRを有効に
- ・衛星シミュレータによる運用手順検証・訓練
 - ・打ち上げクリティカル運用のリハーサル(複数回)
 - ・初期機能確認運用の計画事前策定
(バス系1ヶ月間、観測機器系2ヶ月間)
- ・衛星自動監視システムの導入

ミッション機器、衛星システムの機能確認を完了

軟X線分光装置Resolve

- ✓ 検出器を -273.1°C (50mK)に冷却維持(宇宙空間で人類が作り出した最も低い温度)
- ✓ 分光性能 $<5\text{eV}$ を達成(要求 7eV)

軟X線撮像装置Xtend

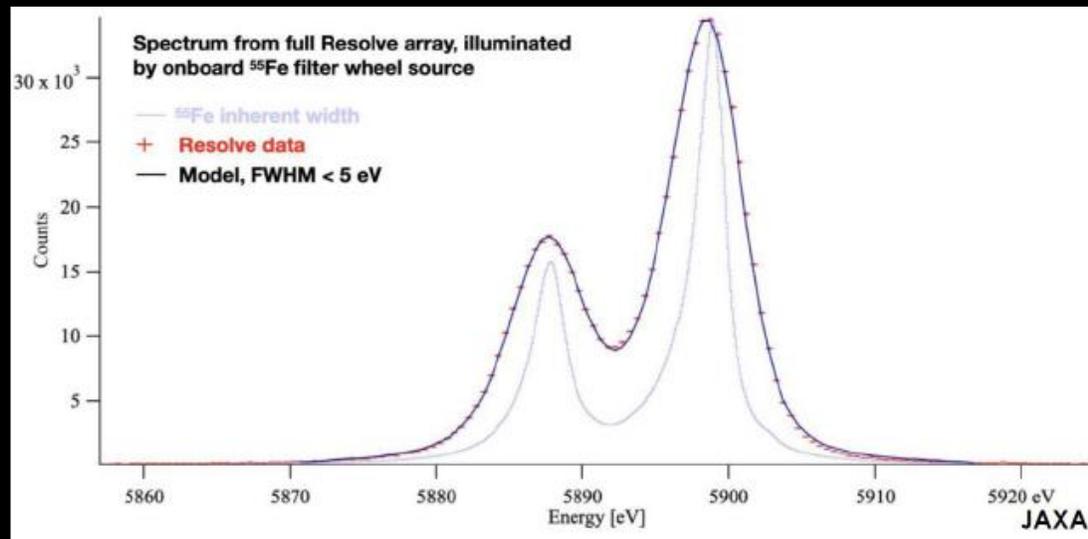
- ✓ 検出器を -110°C に冷却維持
- ✓ 広視野CCDの健全性を確認

中心軸較正、指向精度検証

- ✓ 観測天体が検出器の中央に入るようアライメントを調整
- ✓ 高精度の姿勢制御・姿勢決定と低熱歪の構造で、要求指向精度を達成

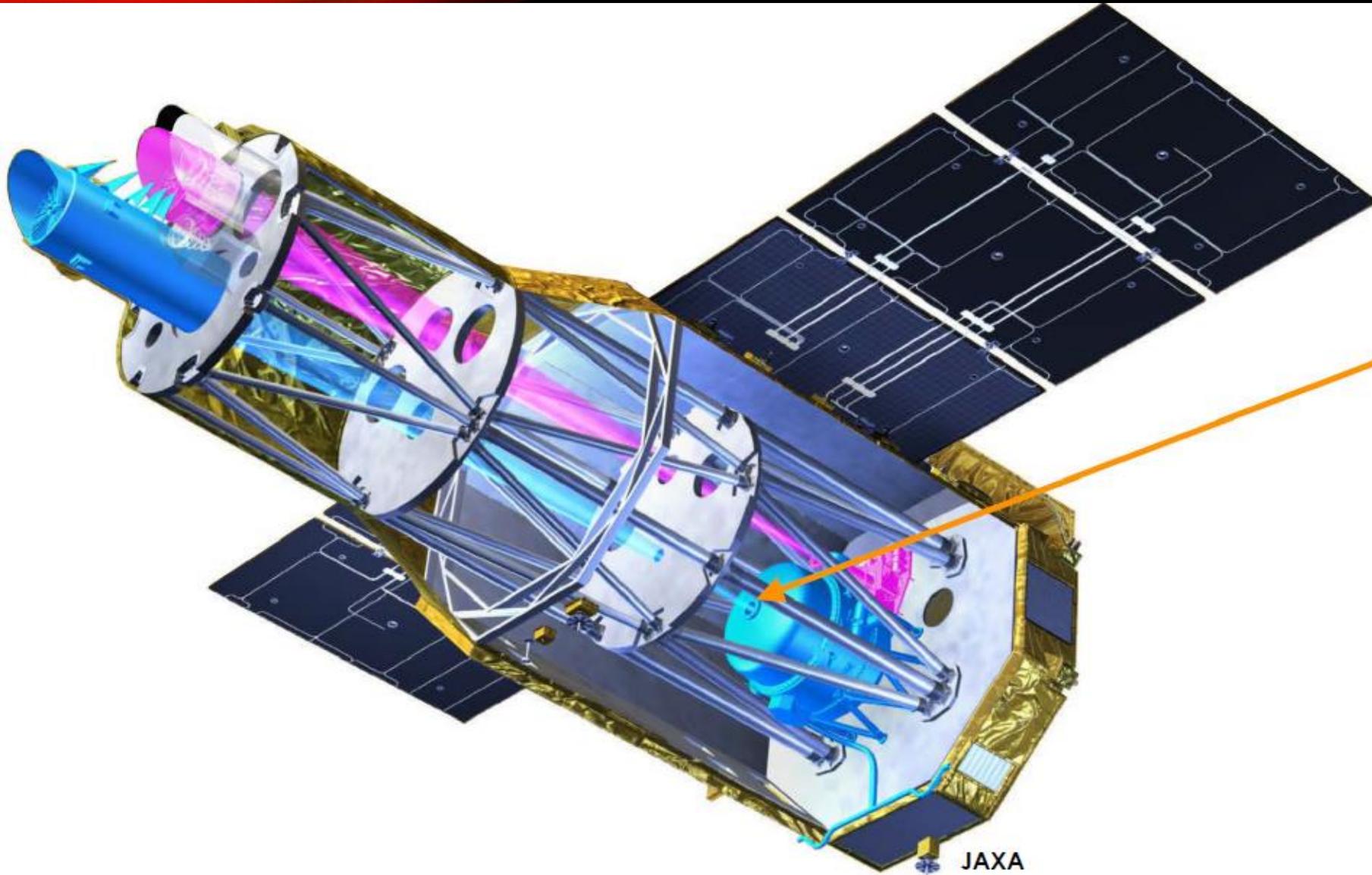
時刻精度検証

- ✓ 要求精度1msec以下を確認



Resolve搭載X線放射線源を用いて分光性能が 5eV 以下であることを確認した

Resolve保護膜が所定の運用で開いていないが、画期的なデータが取得できているため、開放運用の検討を継続しつつ、定常観測運用を行うこととした



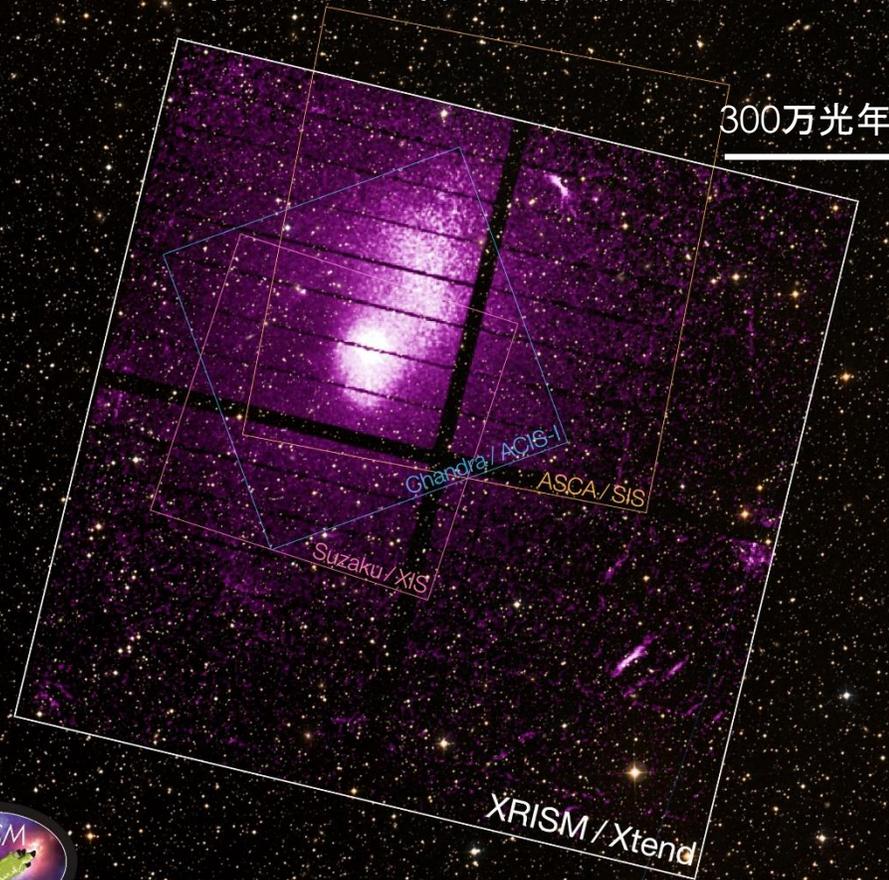
保護膜

- ResolveのX線入射部に設置
- 地上で大気から検出部を保護、打上げ後にアウトガスから検出部を保護
- 約1.8keV以上の高エネルギーX線を透過する250ミクロン厚のベリリウム膜
- 打上げ後に開放してX線帯域を約0.3keVまで拡げる

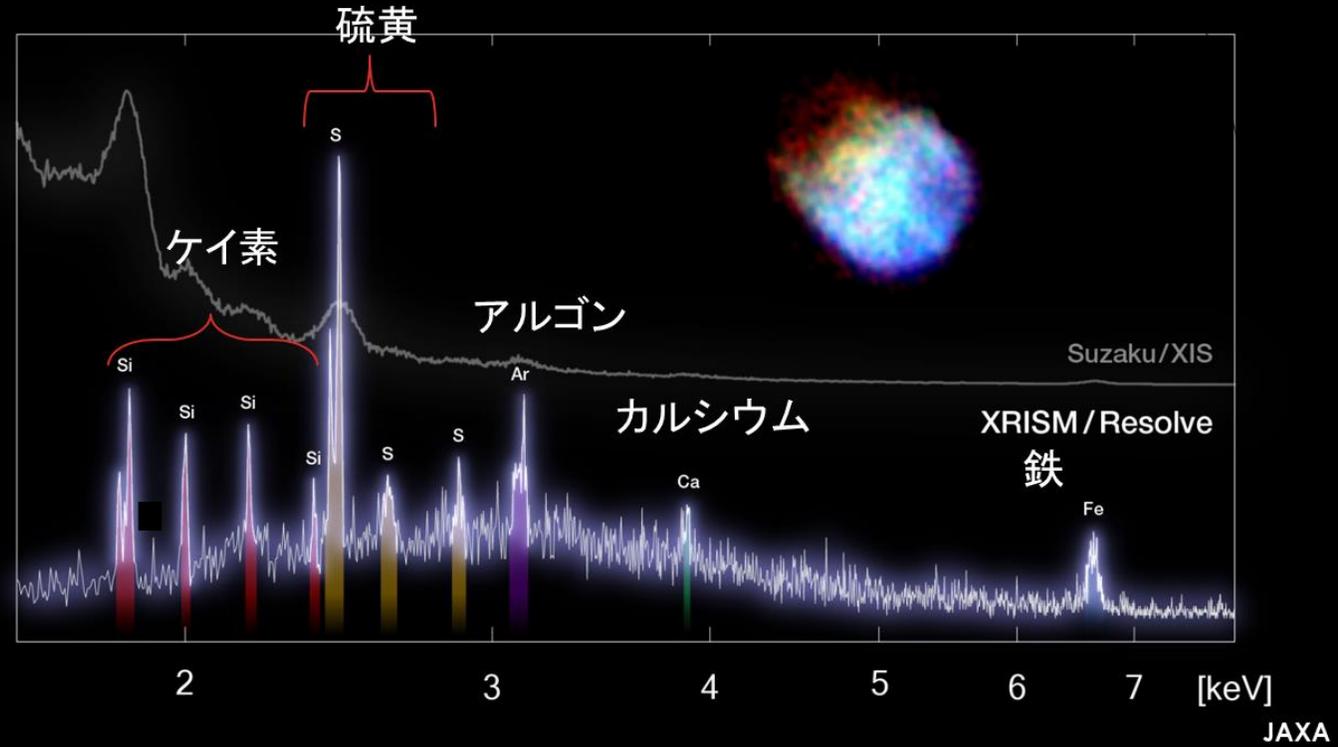
ファーストライト

2024年1月5日にファーストライトを公開した

7億7000万光年先の衝突銀河団A2319



大マゼラン星雲の超新星残骸N132D



X-ray Image of Galaxy Cluster Abell 2319 Captured by **XRISM Xtend**
X線: JAXA, 可視光: DSS

ファーストライトの概要

Xtendは、2023年10月14日から10月24日にかけて7.7億光年の距離にある銀河団Abell 2319を観測を行いX線画像取得に成功しました。また、Resolveは、2023年12月4日から11日にかけて大マゼラン星雲にある超新星残骸(星の爆発の痕) N132Dの観測を行い、精細なX線スペクトルを取得することに成功しました。

- **銀河団Abell 2319の観測**: X線天文衛星「すざく」搭載X線CCDカメラ(XIS)の4倍の広い視野を特長とするX線撮像装置Xtendで撮像をおこない、衝突中の銀河団の全貌をとらえるとともに、衝突しているふたつの銀河団それぞれに付随する高温プラズマの分布も明瞭に分解しています。広い視野と解像度を兼ね備えたXtendのファーストライト画像は、銀河団や宇宙の大規模構造の進化の理解が格段に進むという期待を持たせてくれます。
- **超新星残骸N132Dの観測**: 「すざく」XISの約30倍の高精度分光能力を特長とするX線分光装置ResolveでX線スペクトルを取得し、多数の元素輝線をこれまでになく精度で分離することに成功しました。Resolveの観測により、恒星や惑星、さらには生命のもととなるこれらの元素の宇宙における生成・流転について、新しい知見が得られることが期待されます。

XRISMの武器:広視野と精密分光

Instrument	観測視野 (FOV/pix)	光子エネルギー決定精度 (FWHM @6 keV)
<i>Xtend</i> (XMA + X線CCD)	38分角四方 1280 x 1280 ピクセル	< 250 eV at EOL (< 200 eV at BOL)
<i>Resolve</i> (XMA + X線マイクロカロリメータ)	2.9分角四方 6 x 6 ピクセル	7 eV (goal 5 eV)

満月を収める視野の広い画像
「すざく」やChandraの4倍

鉄輝線帯域で1/1000の精度
CCDにくらべて30倍の分解能
(60色→1800色でX線の世界を描く)

XRISMは

- 汎用天文台として、大きな視野で撮像(*Xtend*)
- 米欧の大型X線天文台と比較しても、重要な鉄*輝線の帯域で圧倒的なエネルギー決定精度(*Resolve*)

*鉄は宇宙に存在する重元素のなかで最も多いもののひとつ

ファーストライト天体の紹介1：衝突銀河団

ダークマターが引き寄せる銀河団同士のダンス

銀河団の設計図—力学的進化

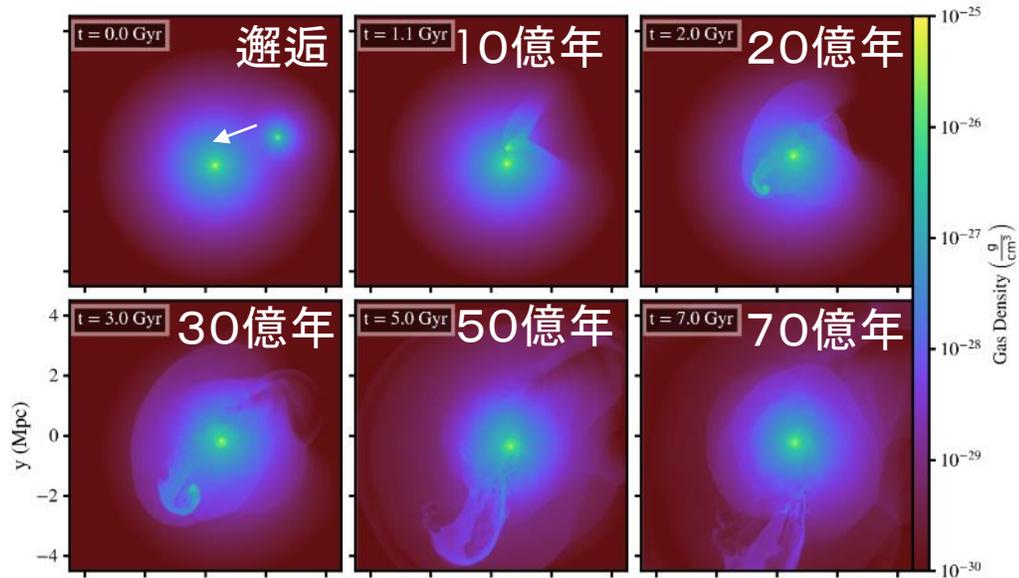
宇宙の大規模構造「銀河団」はどうやってできたか？

ビッグバンで物質が生まれ、重力によって次第に大きな天体ができてきた。原子は星となり、銀河となり、宇宙最大の天体「銀河団」を形成する。

ダークマター(暗黒物質)の重力により銀河や銀河団は衝突合体を繰り返して成長する。銀河団はこのように形成された天体のうち最大のもの



衝突中の銀河団の例:かみのけ座銀河団 (XRISM noteより)
<https://note.com/xrism/n/nb8f03c3da08d>



銀河団には、X線で輝く大量の高温ガスがある(上図マゼンタ) XRISMはX線で銀河団の衝突合体中の現場をみることができる。これによって、銀河とガスを引き寄せているダークマターの質量・分布・運動を研究する。銀河団の衝突は莫大な重力エネルギーが解放される宇宙で最大のエネルギーの現象

銀河団合体の数値シミュレーション
合体によって銀河団高温ガスが渦巻く様子がみえる
Brzycki & ZuHone, ApJ, 883:118 (29pp), 2019

ファーストライト1: XTEND IMAGE OF A2319

2023-10-14 ~ 2023-10-24

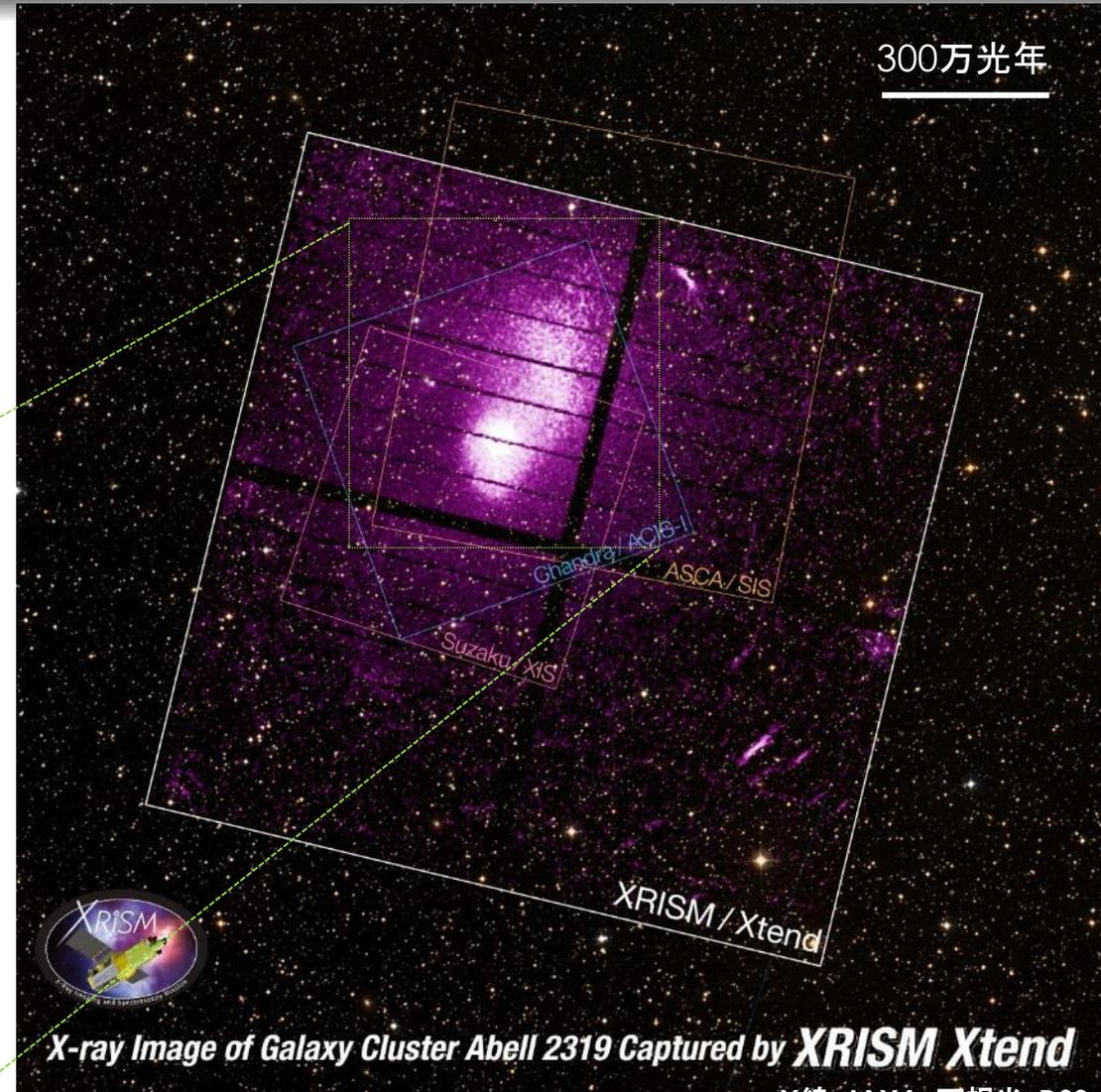
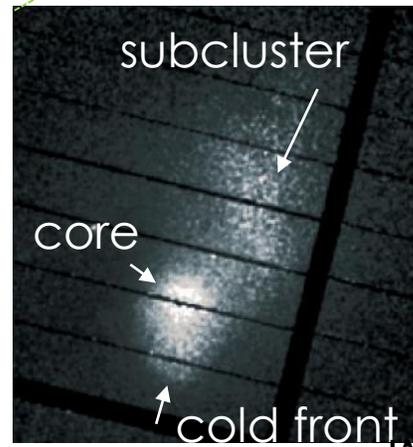
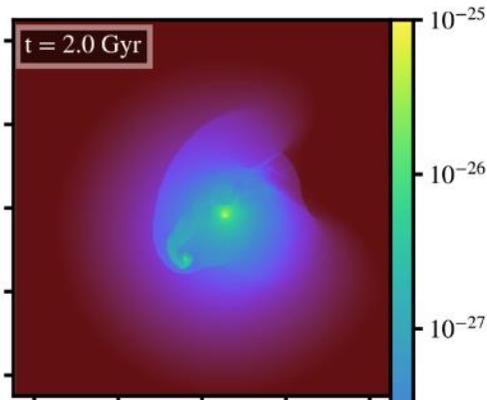
観測中心軸確認運用において、
衝突銀河団 Abell 2319 の撮像に成功

衛星姿勢系と観測軸は所定の精度で一致している

- **Xtendの広い視野**にわたって、想定通りの画像が得られていることを確認。(紫と左下の白色がX線画像)
 - **衝突銀河団の外縁部まで構造が明瞭**にとらえられている。

→ 衝突銀河団の構造ごとの温度や速度などの観測により
ダークマターによる天体形成の謎に迫る。

Brzycki & ZuHone,
ApJ, 883:118 (29pp),
2019



X-ray Image of Galaxy Cluster Abell 2319 Captured by **XRISM Xtend**

X線: JAXA, 可視光: DSS

ファーストライト天体の紹介2:

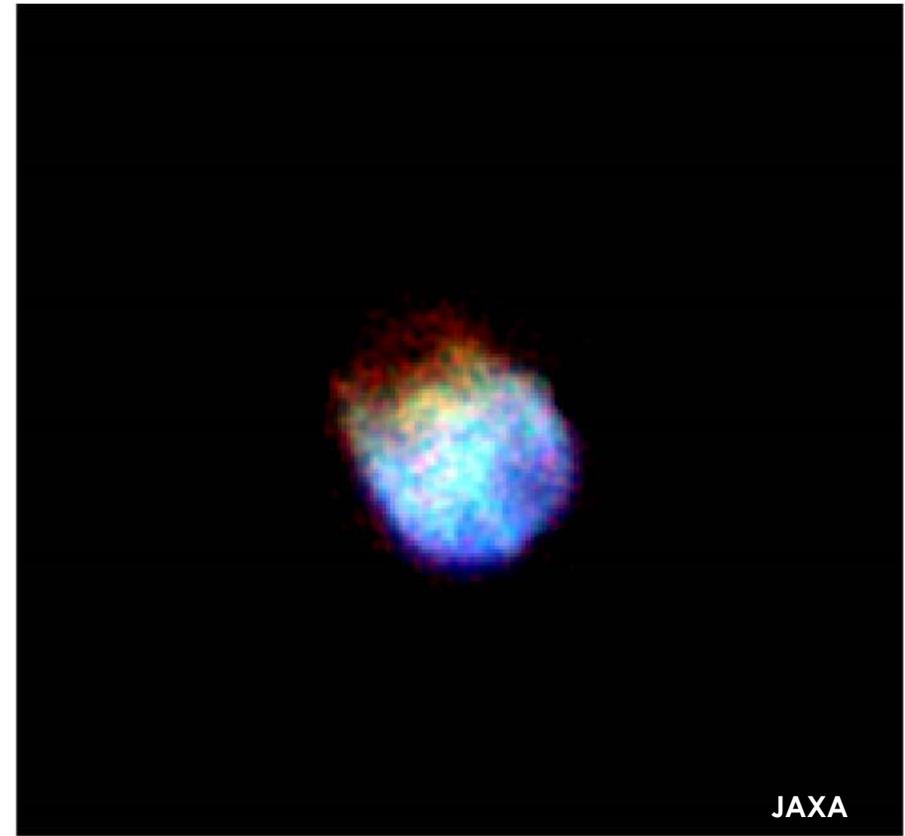
星が残した巨大な「花火」—超新星の残骸にみる宇宙の化学進化

宇宙のレシピ—化学的進化— 宇宙の元素はどうやってつくられてきたのか？

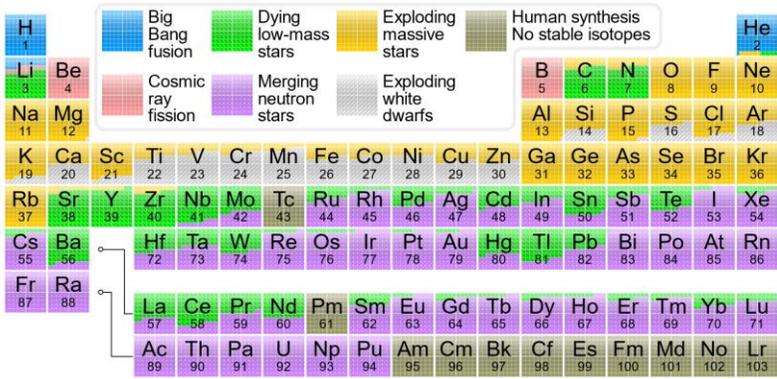
超新星は、終末をむかえた重い星や白色矮星などがおこす、宇宙で最大級の爆発現象。

爆発によって、様々な元素が宇宙空間に広がり、宇宙を豊かにする。

XRISMは、X線スペクトルで超新星残骸のなかの元素の量と速度を測定、物質の生成・循環を追う。



JAXA



元素の周期表。宇宙のどこで作られるかを色で示す。軽い元素の大半は重力崩壊型(黄色)とI α型(灰色)超新星が寄与しており元素ごとにその割合が異なると考えられている。

(Nucleosynthesis periodic table, C. M. G. Lee 2017;
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleosynthesis_periodic_table.svg)

XRISMのXtendで取得した超新星残骸N132D画像
大マゼラン星雲(銀河)のなかでもっとも明るい超新星残骸
色はX線のエネルギーの違いを表す。
超新星残骸の構造と場所ごとの性質の違いが見える。

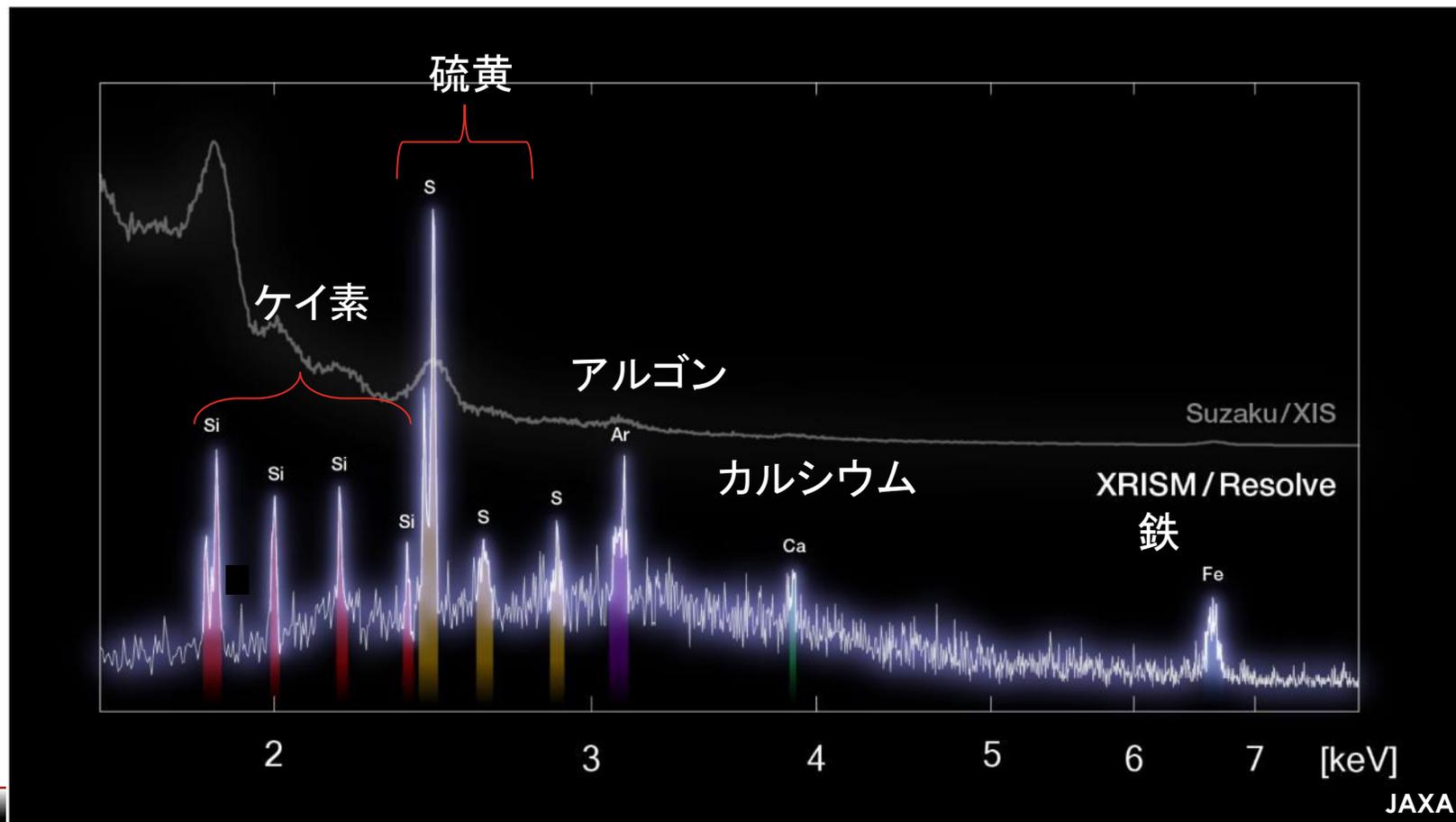
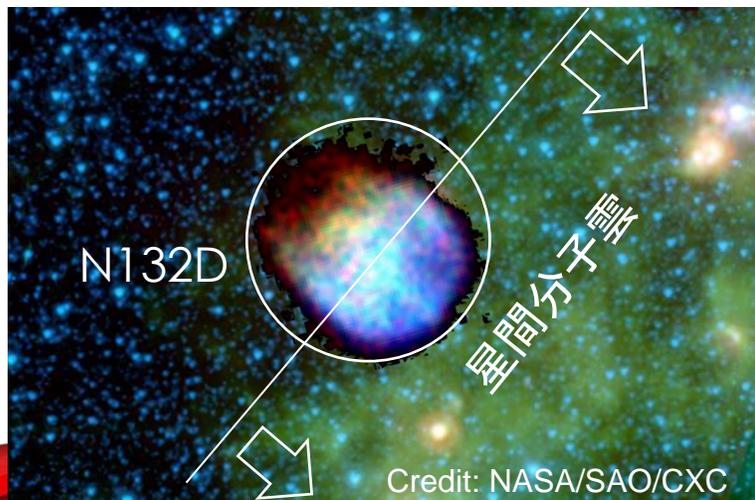
ファーストライト2: RESOLVE SPECTRUM OF N132D

2023-12-4 ~ 2023-12-11 Resolve試験観測 超新星残骸N132D の観測に成功
- 1,800-10,000 eV超のエネルギー帯域で、超高分解能X線スペクトルの取得に成功
- ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄 などの元素からのX線輝線を高精度で検出。

元素の種類と量、温度、速度に対する
圧倒的な感度を確認した。

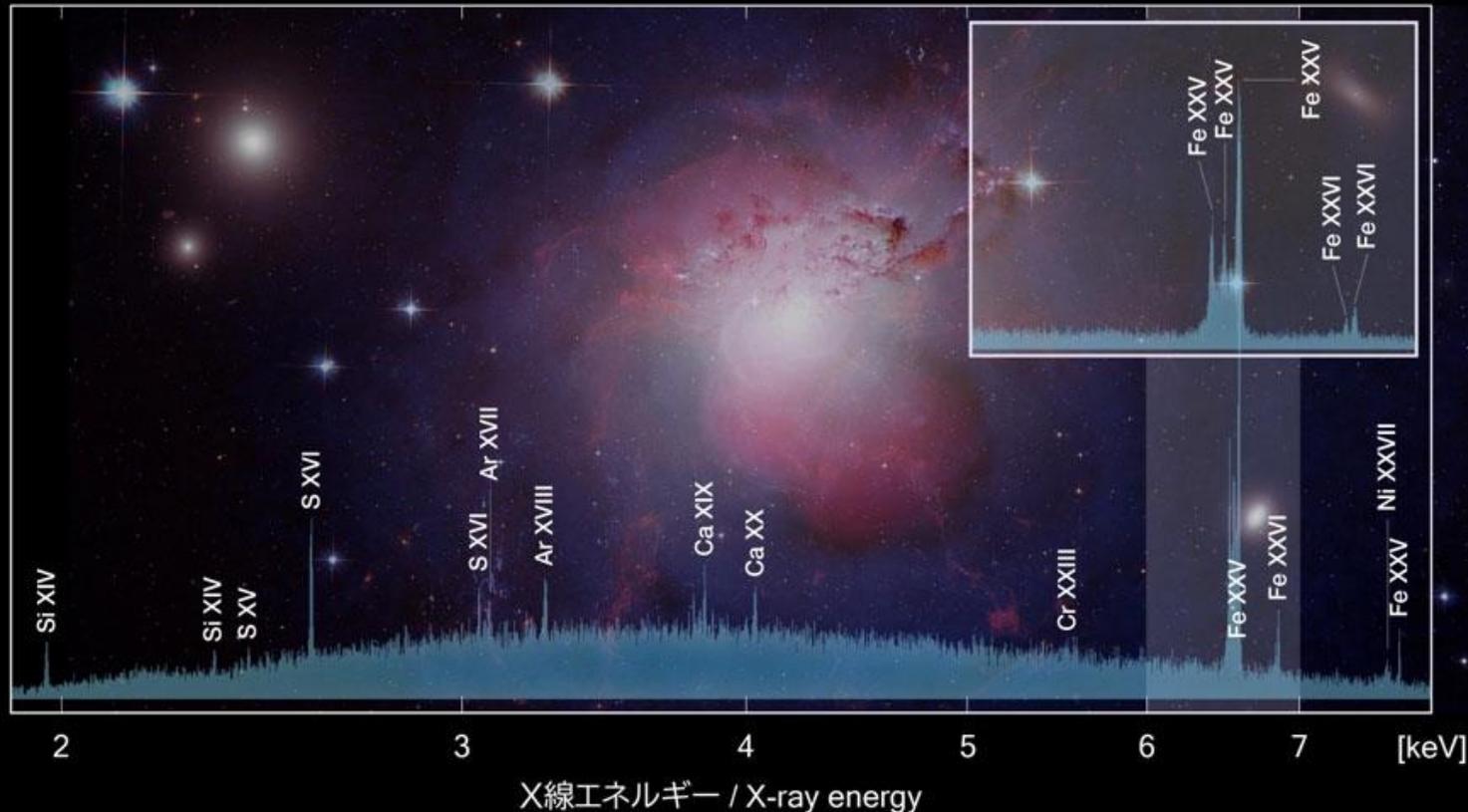
→ 多数の元素ごとの電離状態や
運動を測定

→ 元素合成から星間空間への
物質循環を解明する。



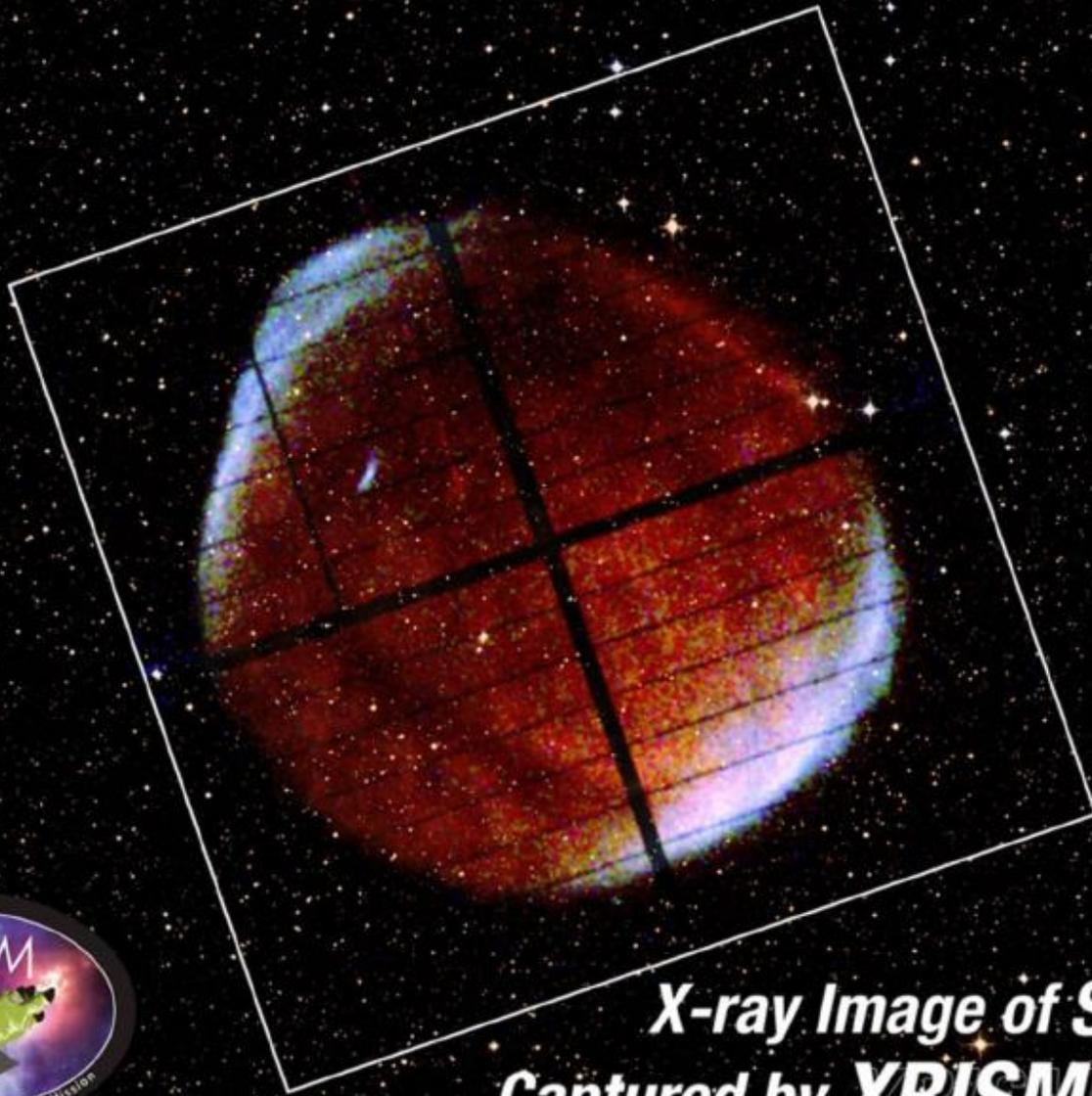


X-ray Spectrum of Perseus Galaxy Cluster Measured by XRISM Resolve



- ファーストライト以降の初期科学観測データの例
- 2024年3月4日に公開した
- 軟X線分光装置 (Resolve : リゾルブ) で取得したペルセウス座銀河団中心部のスペクトル
- 地球から約2億4千万光年の距離に位置
- Resolve による精細なX線スペクトルから、プラズマの温度や速度を精密に測定することで、宇宙の力学的進化を支配する暗黒物質の分布や動きや、銀河団がどのようなプロセスで作られ、今後どのように進化するのかを明らかにできると期待

ペルセウス座銀河団のX線スペクトル。背景の画像は観測領域付近のX線・可視光・電波の合成画像。中央は銀河団の中心にある銀河 NGC 1275。右上の四角で囲った部分は6keV から7keV のスペクトルの拡大図。(クレジット: JAXA/NASA/CXC*/IoA**/A.Fabian et al./NRAO/VLA/G. Taylor/ESA/Hubble Heritage (STScI/AURA)/Univ. of Cambridge)* Chandra X-ray Center ** the Institute of Astronomy in Cambridge, UK



X-ray Image of SN 1006
Captured by XRISM Xtend

- 軟X線撮像装置 (Xtend) で取得された超新星残骸SN1006のX線画像
- 西暦1006年に爆発した超新星の残骸
- おおかみ座の方向、地球から約7000光年の距離に位置
- 爆発から1000年あまりで直径65光年の球状の天体へと成長し現在も秒速5000キロメートルの速さで膨張し続けている
- 見かけ上の大きさが満月とほぼ同じで約30分角の視直径を持つ
- Xtendの広い視野の有効性を示す
- 爆発の際の核融合反応によって作られた元素の量や、残骸が膨張する様子を調べる

超新星残骸SN 1006のX線と可視光の合成画像。
(クレジット: X線:JAXA/可視光:DSS***) ** The Digitized Sky Survey

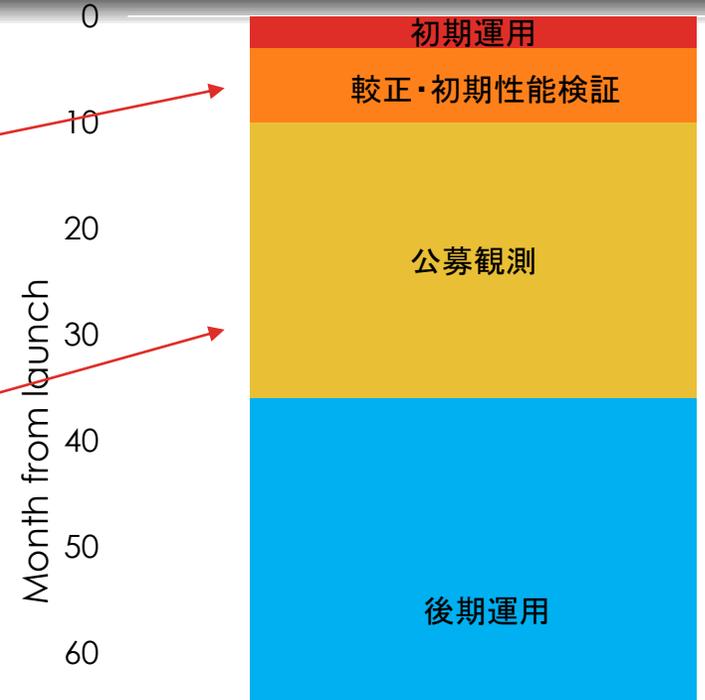
XRISMが挑む宇宙の謎

- **銀河団の設計図—力学的進化—宇宙の大規模構造「銀河団」はどうやってできたか？**
 - XRISMによって銀河団の成長現場である銀河団衝突を見る
- **宇宙のレシピ—宇宙の元素はどうつくり、行き渡っててきたのか？**
 - 超新星の種族ごとの元素合成と、星間空間への供給の様子を見る
- **時空のはて—コンパクト天体の周りのプラズマの構造**
 - ブラックホールや中性子星、白色矮星など「コンパクト天体」の強力な重力場中の物質状態を見る
- **画期的な装置(X線マイクロカロリメータ)が拓く新しい観測手法と宇宙物理**
 - ALMA, LiteBIRD, JWST, Subaru/TMT, XMM-Newton, Chandra, NuSTAR, Fermi, CTA, IceCube, LIGO, KAGRA など世界のマルチメッセンジャー天文台の一翼として

**XRISMの特長である広視野と輝線感度で、
さまざまな宇宙の謎に挑みます！**

世界に開かれた天文台として

- 定常運用段階(打ち上げ後3年まで)
 - 初期性能確認観測(6 か月)
 - XRISMの特長を生かす約50の候補天体から観測
 - 日米欧200人余りの研究者が参加。
 - 随時、初期成果を発表していく
 - 観測提案にもとづくゲスト観測
 - JAXA, NASA, ESA それぞれが、観測提案の公募を行い、選考によって採択された観測を行う。
 - 予め定めた時間配分の範囲で、全世界の研究者に観測の機会を提供
- 後期運用段階へ(打ち上げ後3年以降)



計画参加機関

宇宙航空研究開発機構 (JAXA), 米国航空宇宙局 (NASA),

欧州宇宙機関 (ESA), 東京都立大学, 金沢大学, 関東学院大学, 宮崎大学, 埼玉大学,

SRON (Neitherlands Institute for Space Research), University of Geneva, Canadian Space Agency,

中央大学, 愛媛大学, 福岡大学, 藤田医科大学, 広島大学, 鹿児島大学, 近畿大学, 関西学院大学,
甲南大学, 京都大学, 名古屋大学, 奈良教育大学, 奈良女子大学, 日本福祉大学, 大阪大学,
理化学研究所, 立教大学, 芝浦工業大学, 静岡大学, 東北学院大学, 東京大学, 東京理科大学,
早稲田大学, 福岡教育大学, 熊本学園大学, 明治大学,

Gravitation AstroParticle Physics Amsterdam, Canadian Light Source Inc.,
University of Chicago, University of Durham, European Southern Observatory,
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Lawrence Livermore National Laboratory,
Leiden University, University of Maryland, Massachusetts Institute of Technology,
University of Maryland, University of Michigan, Saint Mary's University,
University of Waterloo, University of Wisconsin, Yale University