

極低温光子検出器を用いた 宇宙望遠鏡による最新天文学研究

...

JAXA 宇宙科学研究所 辻本 匡弘 <tsujimoto.masahiro@jaxa.jp>

アブストラクト

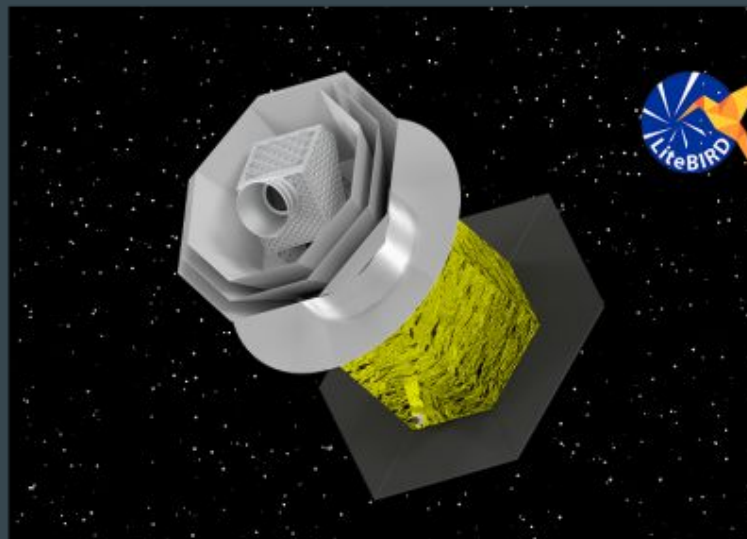
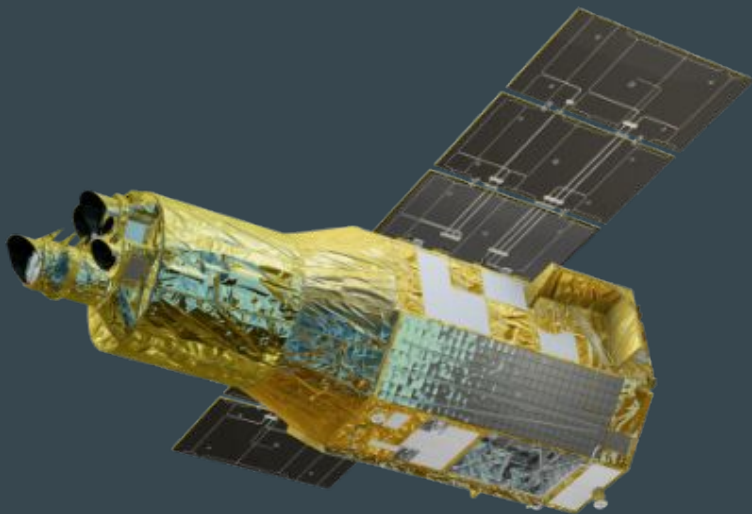
- 最新の天文学の観測では、非常に微弱な光子 (約1fJ) を捉えることに成功しています。その原動力の1つが、極低温検出器の実用化です。検出器を極低温 (約0.1K) に冷却し、その熱容量を下げることで、微弱光子の吸収による温度上昇を測定するものです。
- また、広い電磁波帯域の多くの波長域で、大気圏外での観測が必要です。
- そこで、衛星＝宇宙望遠鏡に極低温検出器を搭載して観測することになりますが、その技術的な難易度は極めて高いです。
- JAXAでは、これに長年挑戦し、2023年9月7日に宇宙X線を観測するXRISM衛星を打ち上げました。また、2036年の打ち上げを目指して宇宙マイクロ波背景放射を観測するLiteBIRD衛星を計画しています。
- 前半では、XRISM 衛星、後半では LiteBIRD 衛星について紹介します。これらの最先端の国際科学プロジェクトにおいて、大学院生がどのように貢献、活躍しているかをお伝えします。

おさそい

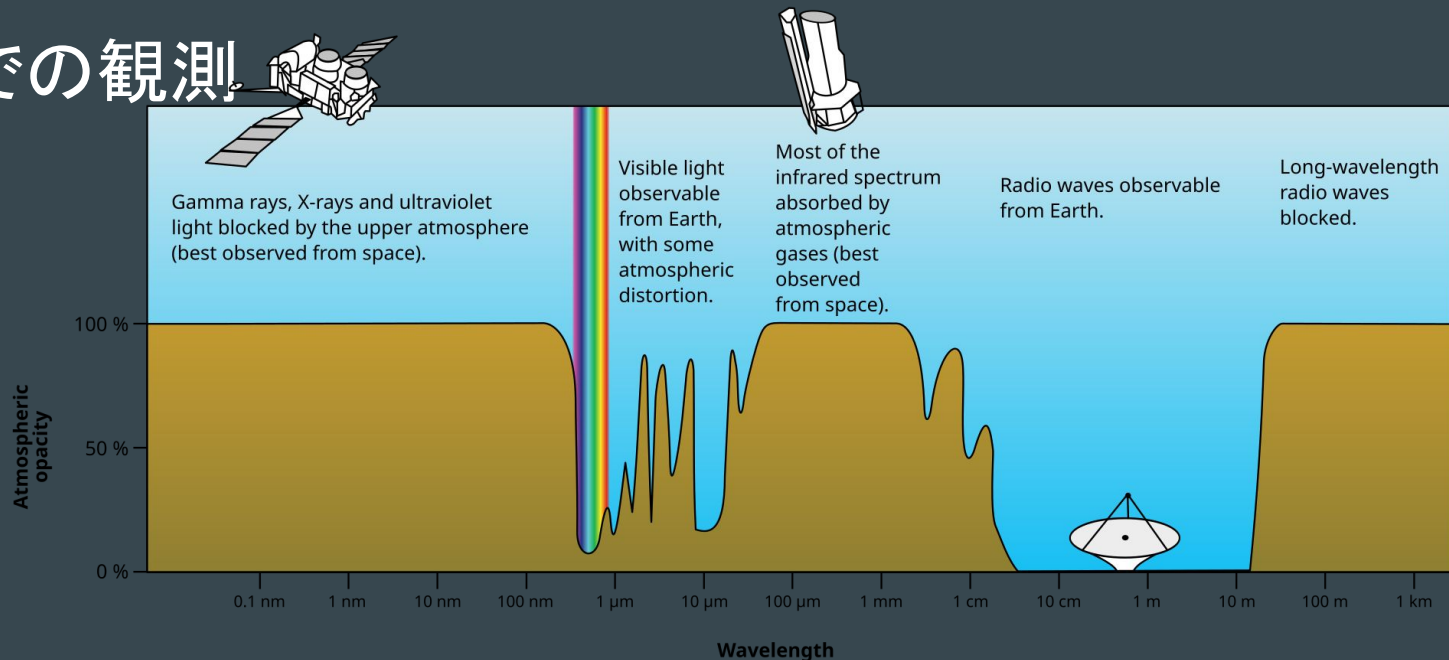
- 宇宙研で大学院の研究ができます。
 - 東大(理学研究科天文 or 物理)
 - 総研大(宇宙科学専攻)
 - 連携大学院(法政・青学・北里・都立大・諏訪理科大・東京科学大関学)
 - それ以外のすべての大学(受託指導・技術習得)
- 天体物理学研究や衛星開発の現場で、すぐに活躍したい人を募集。
 - 出身の大学や学部、経験は問いません。
- ご興味があれば、
 - 2026年度 JAXA相模原キャンパス特別公開 (2026/11/7)
 - 研究室見学 (随時)
 - 研究室インターン (2027/8予定)

内容

1. XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission)
2. LiteBIRD (Light spacecraft for the study of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)



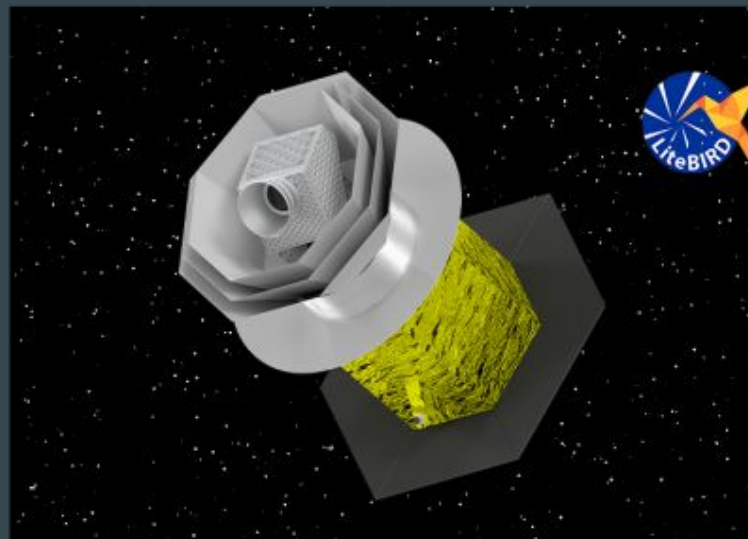
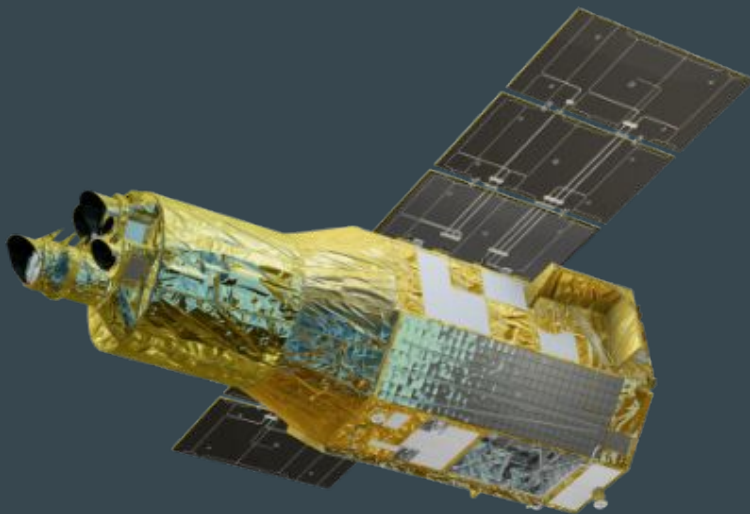
大気圏外での観測



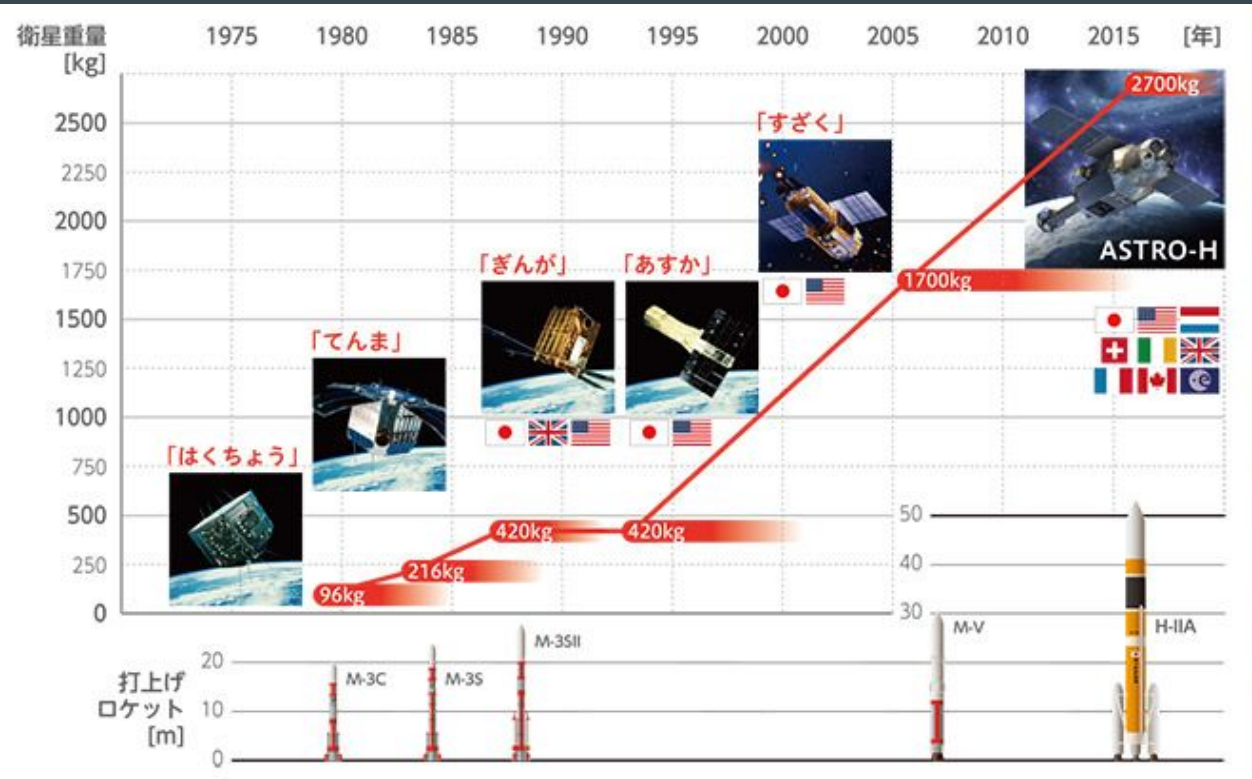
- 天文観測の本流である電磁波の多くは、大気圏外での観測が必須。
- 日本のスペース天文学の総本山が宇宙科学研究所(相模原市)。
- 前身は東京大学宇宙航空研究所。2003 年 JAXA に合併。

内容

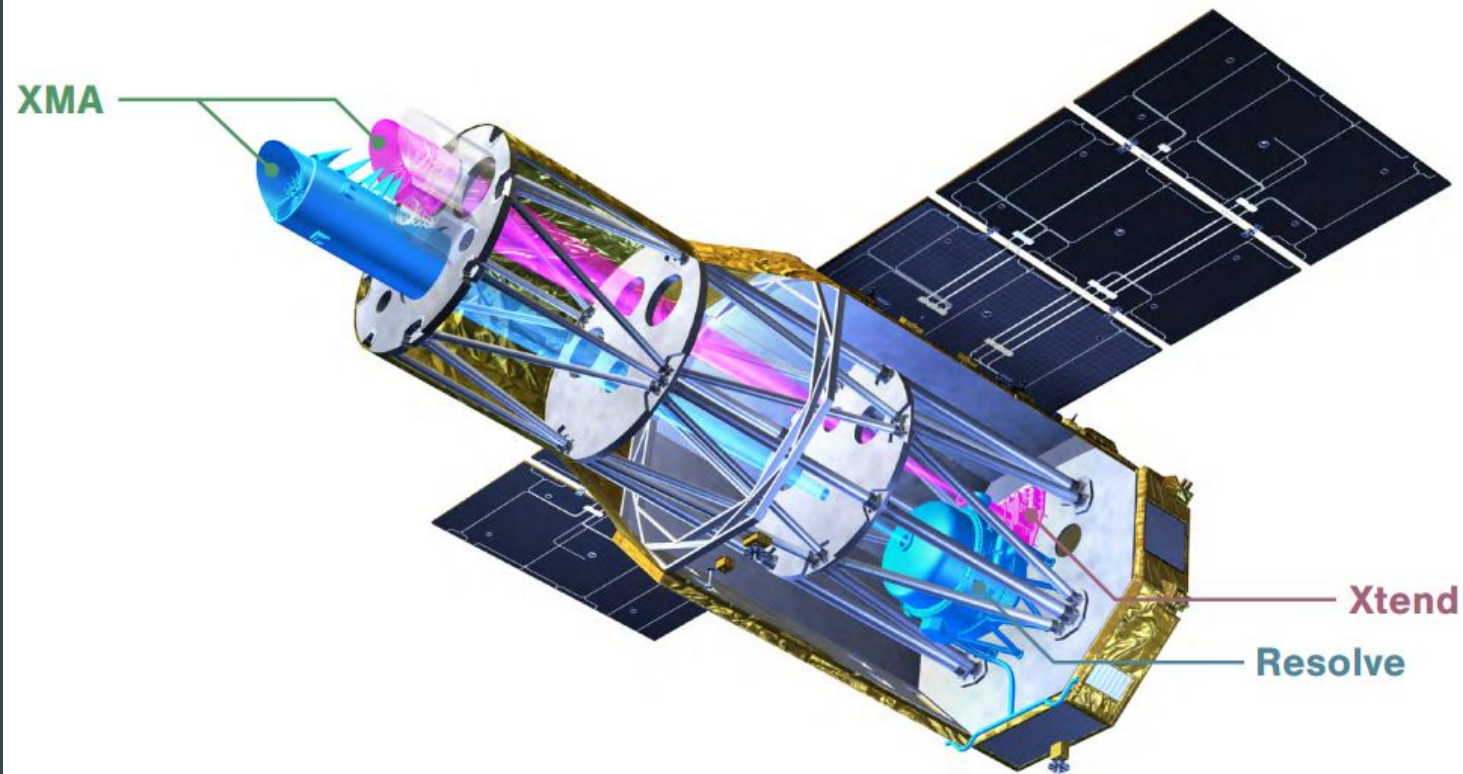
1. **XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission)**
2. LiteBIRD (Light spacecraft for the study of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)



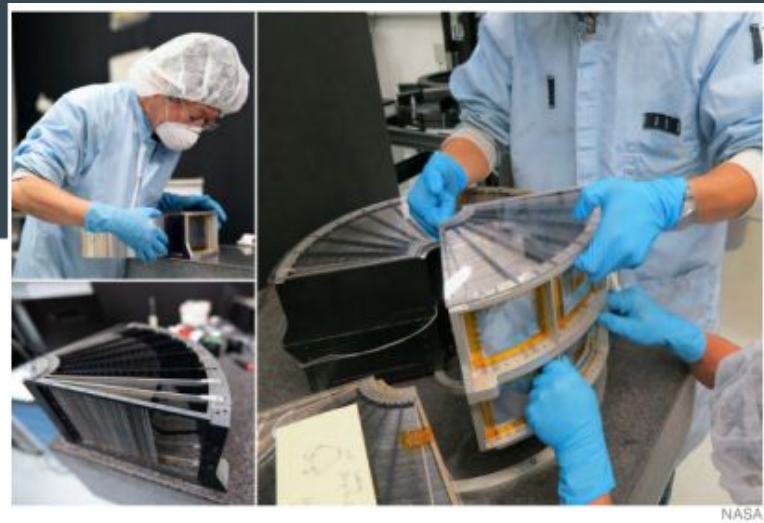
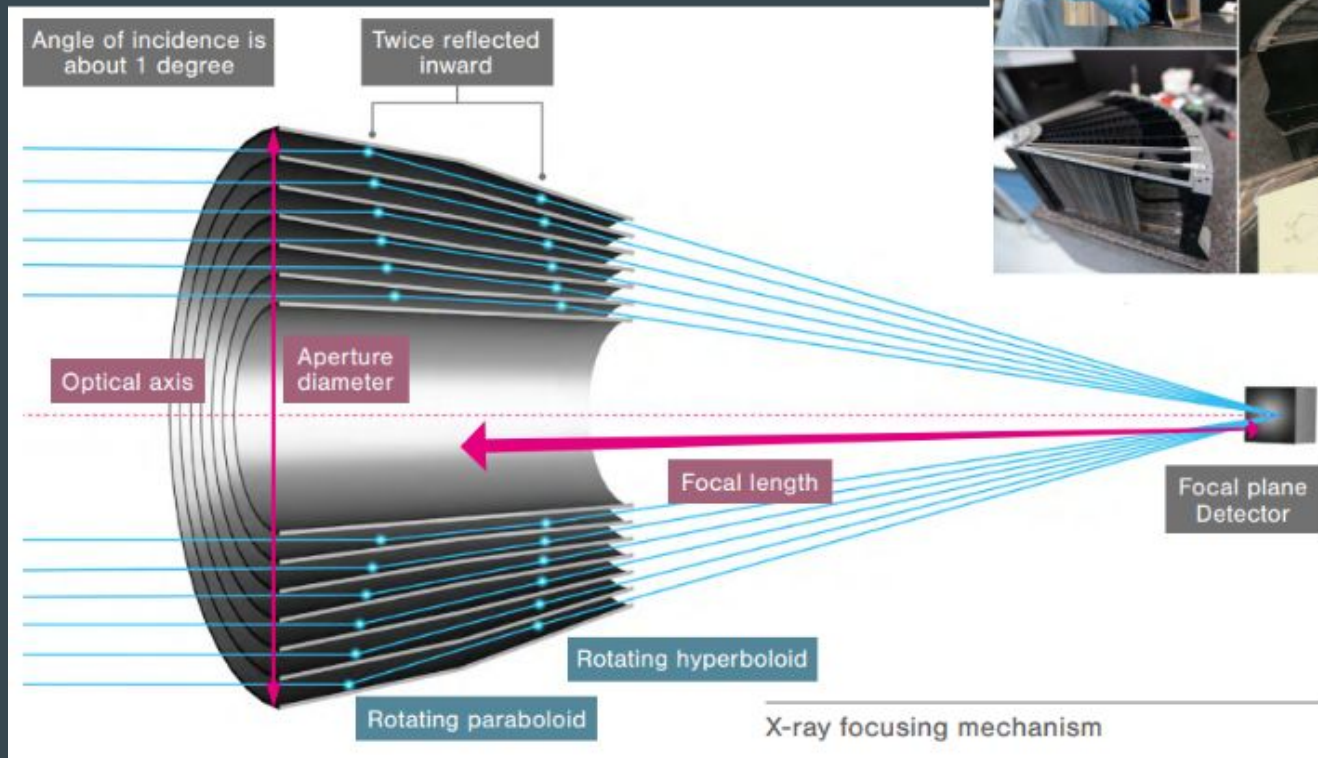
日本のX線天文学の歴史



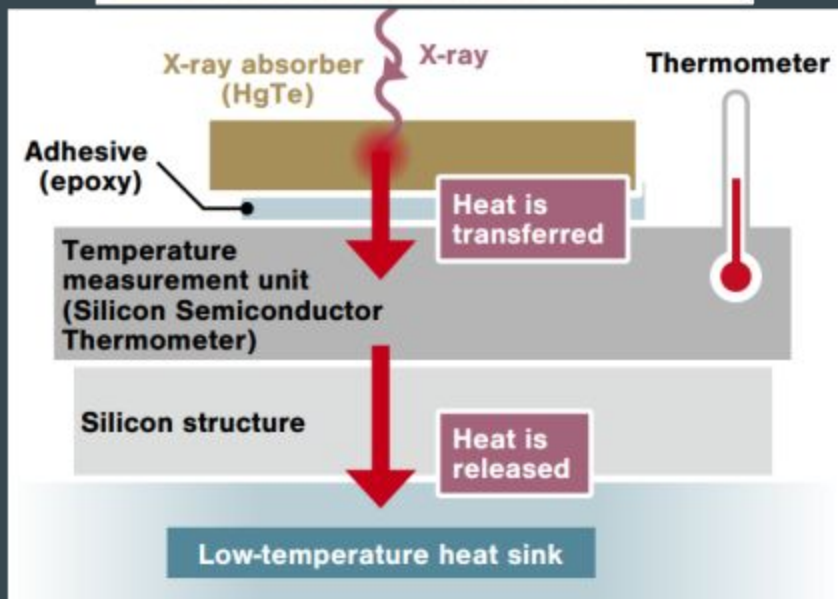
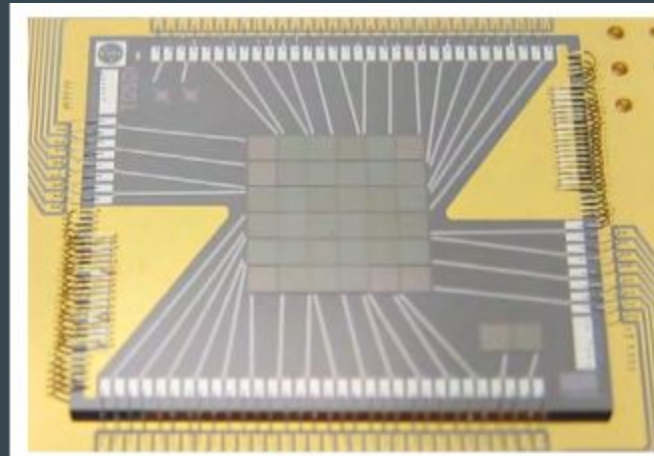
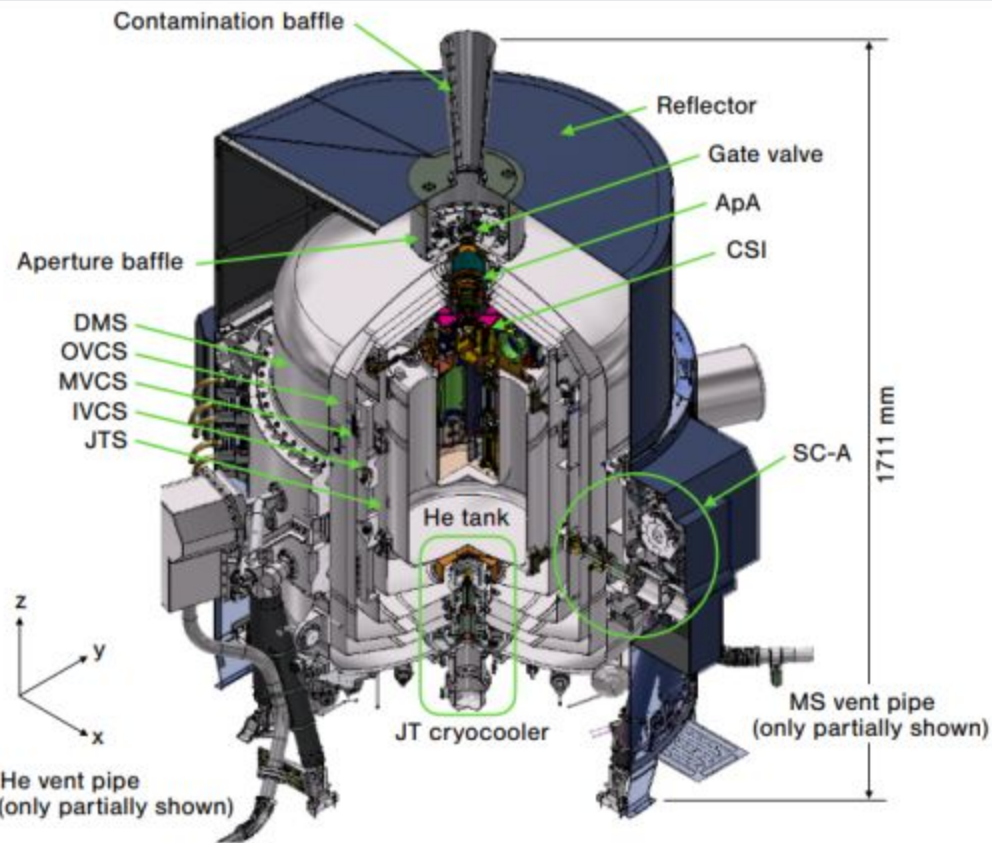
XRISM衛星



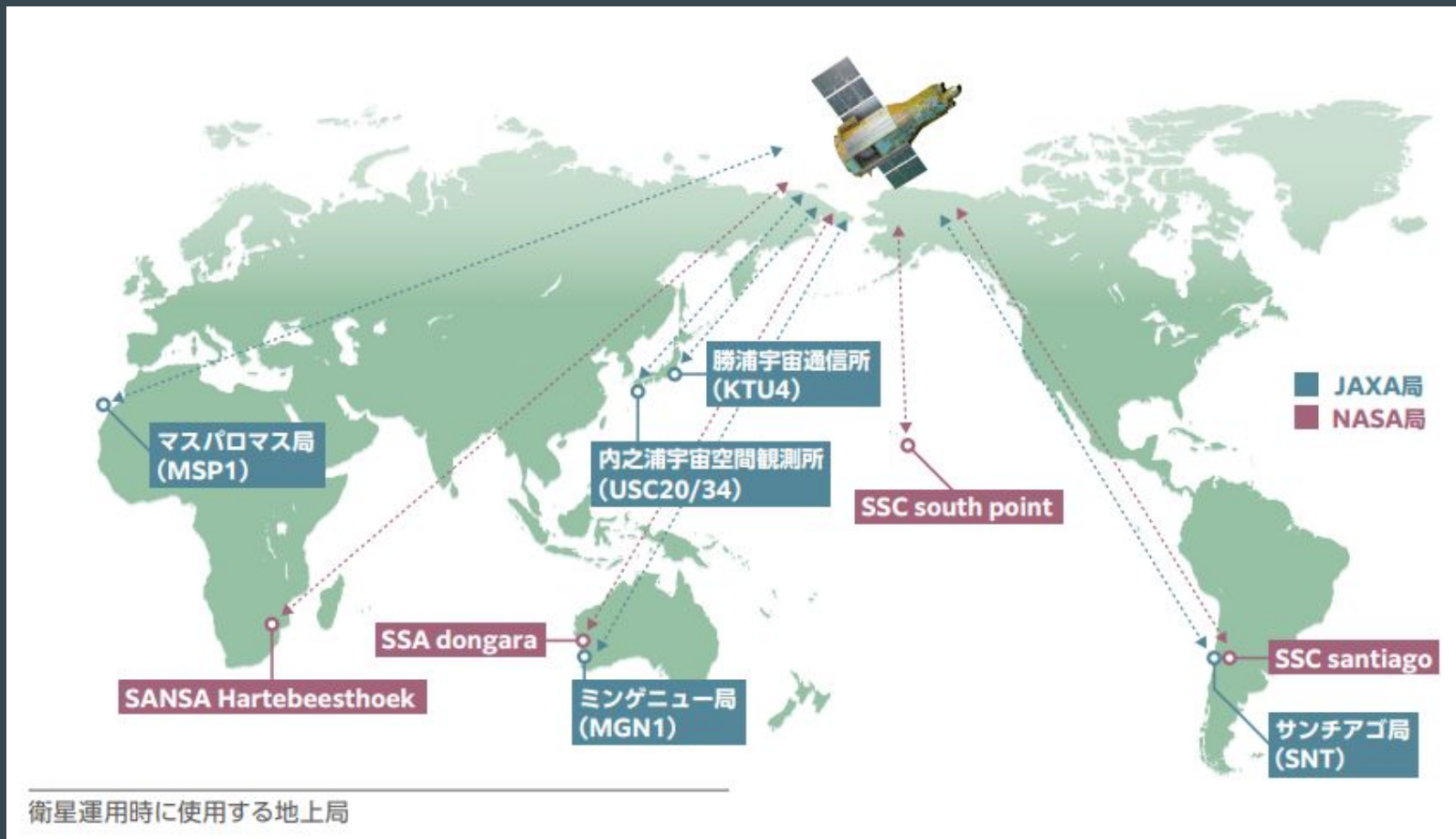
X線望遠鏡



X線検出器

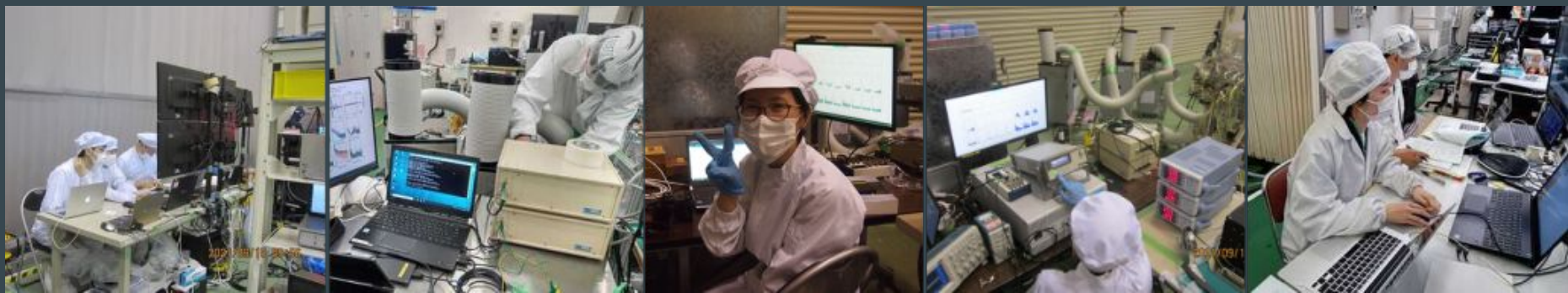


運用



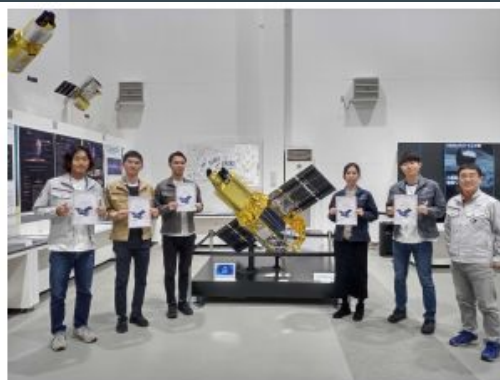






- ・ JAXA 筑波宇宙センター等で、各国宇宙機関 (NASA 等) や宇宙開発企業の熟練の科学者・技術者と一緒に仕事をします (JAXA 入りメールアドレスと顔写真入りカードキーがもらえます)
- ・ 衛星開発のかなり重要かつ学術的価値の高い課題 (観測装置への電磁・微小擾乱干渉、X 線イベント処理、検出器ノイズ評価など) を任されます。





- 2026 年 第 25 回高宇連研究会博士論文賞 (D3 栗原)
- 2026 年 芝浦工業大学 電気電子情報工学専攻賞 (M2 鳥海)
- 2026 年 Springer 博士論文賞 (D3 栗原)
- 2024 年 第 3 回 XRISM 大学院生貢献賞 (M2 望月)
- 2024 年 総研大物理科学研究科長賞 (D3 大間々)
- 2023 年 第 18 回ロレアル・ユネスコ女性科学者 日本奨励賞 (D3 富永)
- 2023 年 宇宙地球フロンティア国際卓越大学院 Final Examination 優秀賞 (D3 富永)
- 2023 年 第 2 回 XRISM 大学院生貢献賞 (M2 栗原, B4 柏崎)
- 2023 年 第 13 回測定器開発優秀修士論文賞 (M2 栗原)
- 2022 年 第 1 回 XRISM 大学院生貢献賞 (D2 御堂岡, M1 栗原, D1 大間々)
- 2021 年 宇宙地球フロンティア国際卓越大学院 Qualify Examination 優秀賞 (M2 富永)

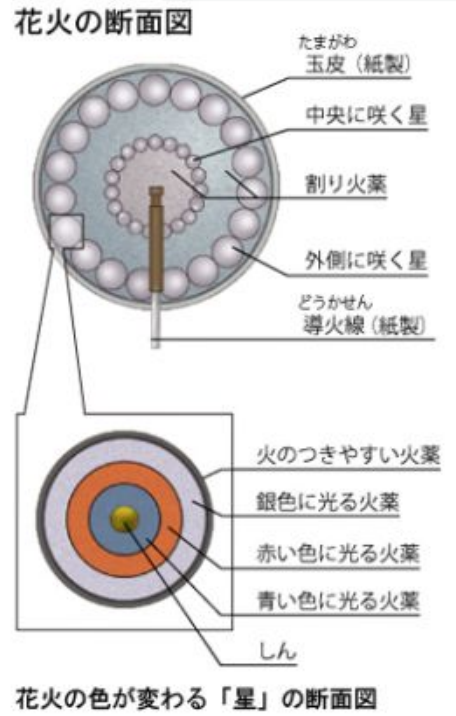
分光とは？



分光とは？＝「色分け」力



分光とは？



天文X線分光でわかること

対象:宇宙の高温プラズマ+高温プラズマに照射された低温物質

天体:宇宙の高エネルギー天体 ... 恒星、コンパクト星(ブラックホール・中性子星・白色矮星)、星間物質、超新星残骸、活動銀河核、銀河団など

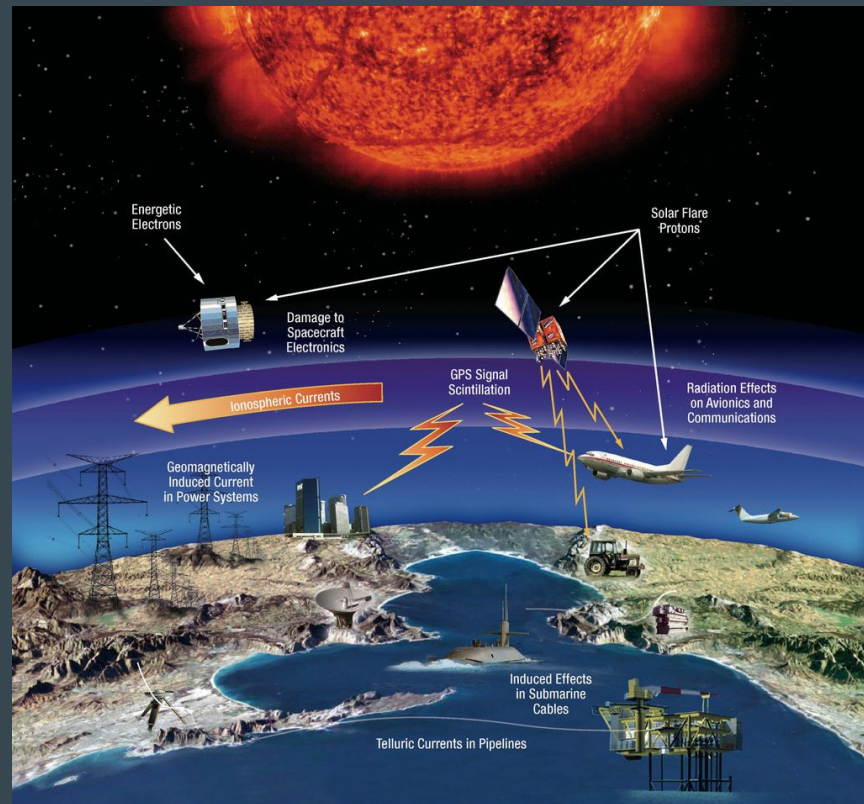
わかること:

- 元素の種類、電離度、励起度
- 物質の密度・速度
- 輝線が形成された現場の様子 ... 光子のエネルギー分布(輻射場)、電子エネルギー分布(Maxwellian?)、磁場
- 高温プラズマがどう冷却するか?

XRISMを用いた研究の一例

太陽に似た恒星における巨大フレアの研究

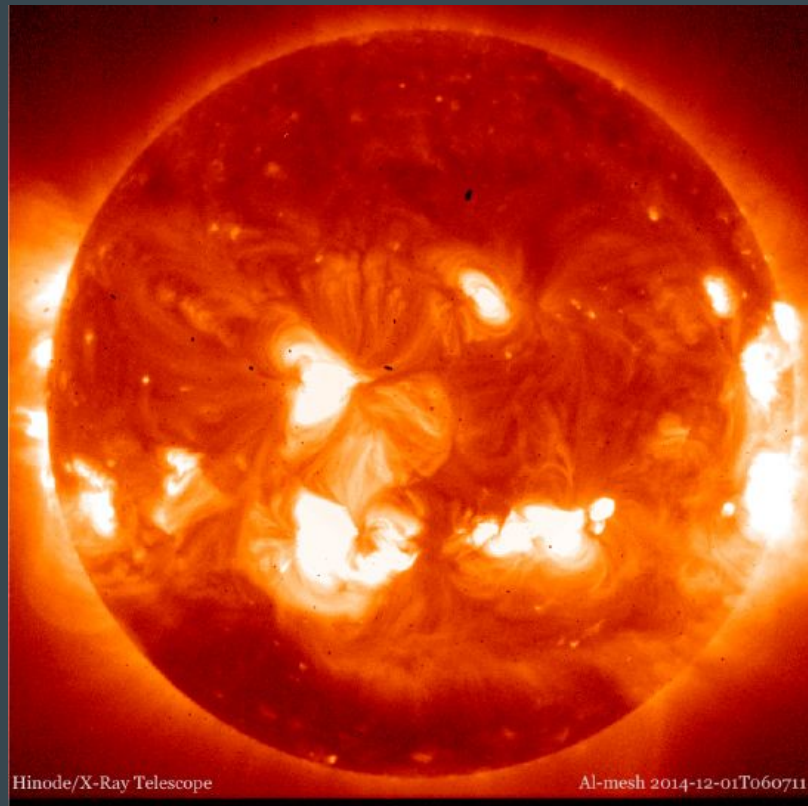
- 太陽では11年周期の活動期。極大時に数発程度のフレア発生。差動回転と磁場による蓄積エネルギーの瞬間的開放
- 現代文明にもろもろの影響。
- 過去には、より規模の大きいスーパーフレアも発生したと考えられている。ただし頻度が低いので観測できない。
- 遠方の太陽型恒星では、通常の太陽フレアの1000万倍のエネルギーを持つ超巨大フレアがしょっちゅう起こっている。
- 遠方の恒星をリモートセンシングしよう。



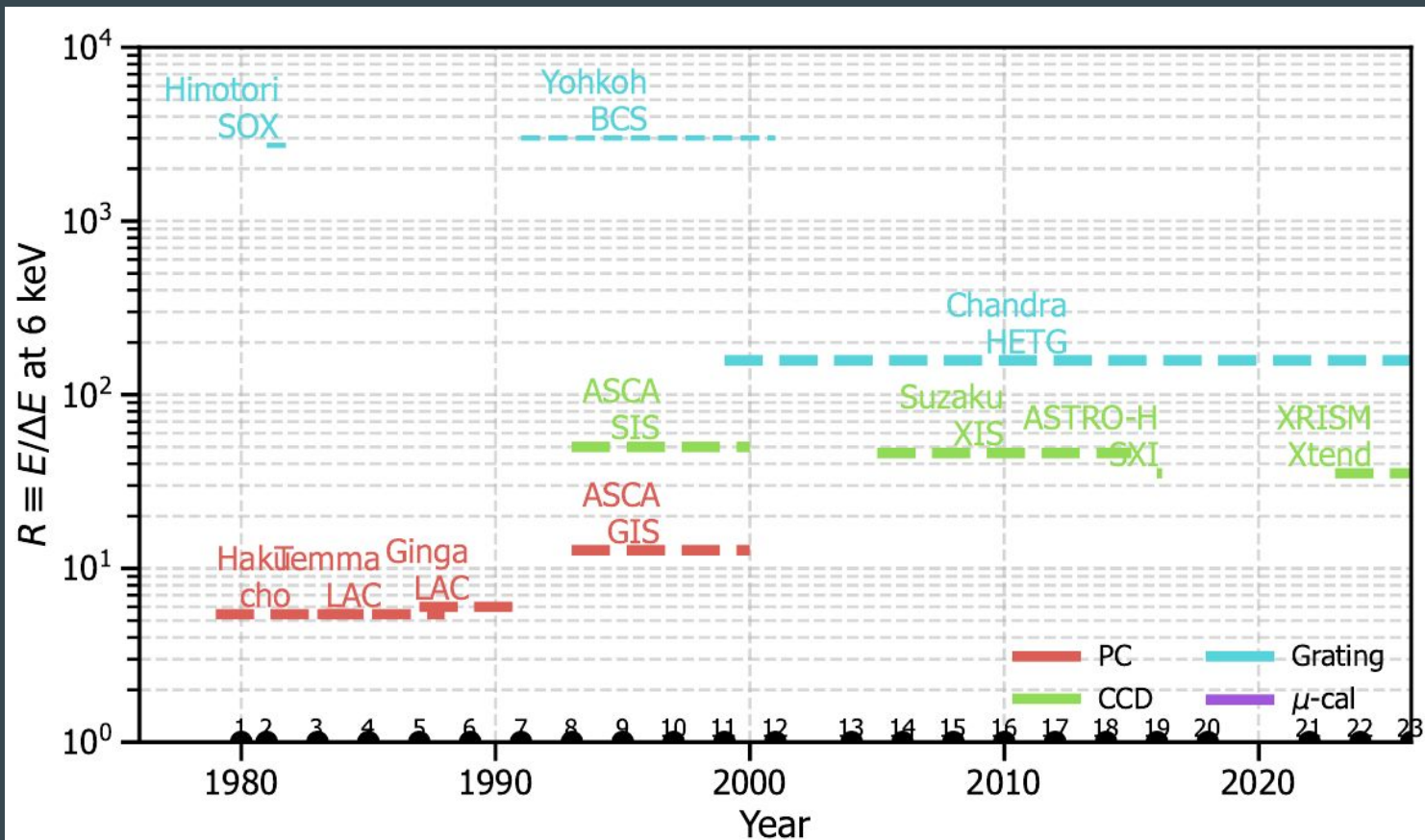
XRISMを用いた研究の一例

太陽に似た恒星における巨大フレアの研究

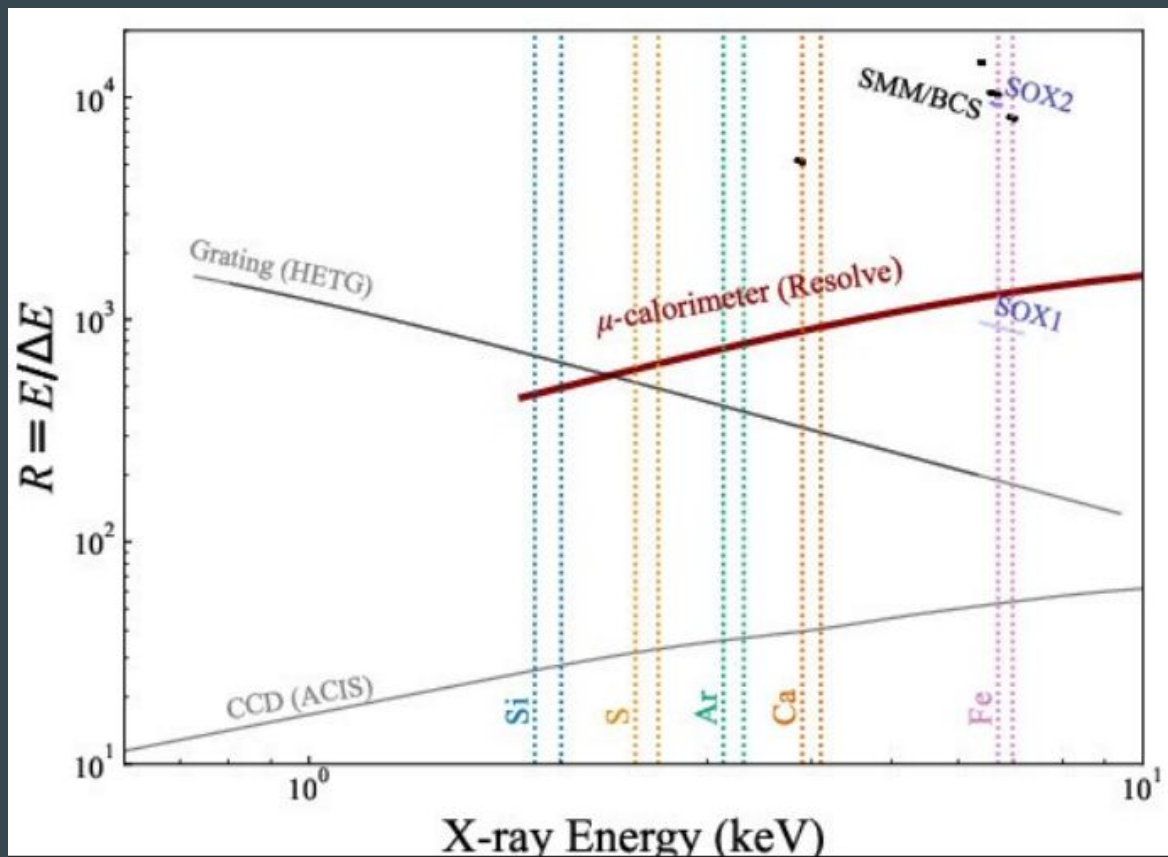
- 遠方の恒星をリモートセンシングしよう。
- 高温プラズマなのでX線観測が最適
- しかし、太陽のように「撮像」はできないので、「分光」を手がかりにする。



X線分光器の分光能力

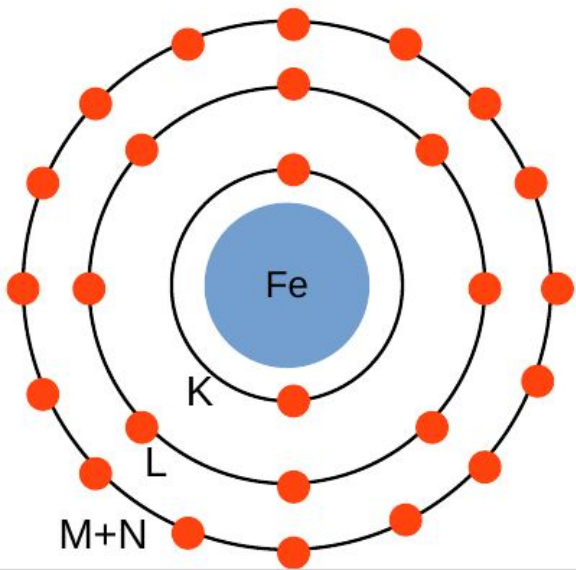


X線分光器の分光能力

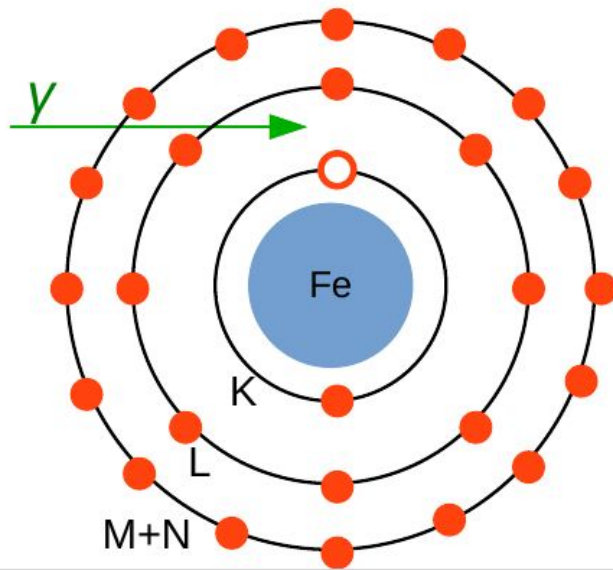


鉄蛍光X線

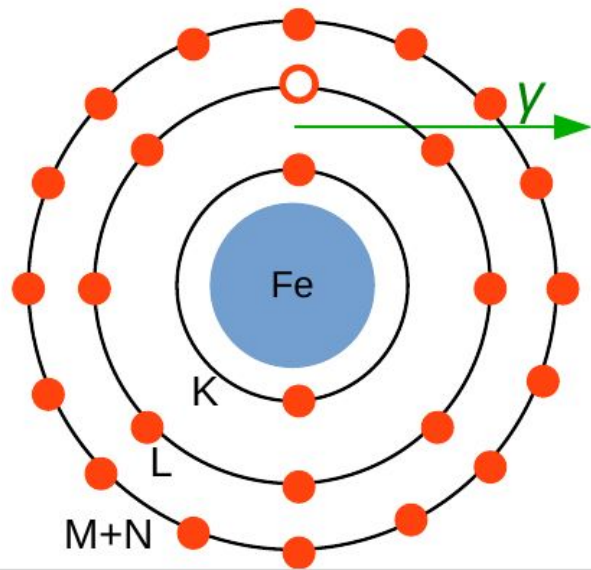
Neutral Fe



Photoionization

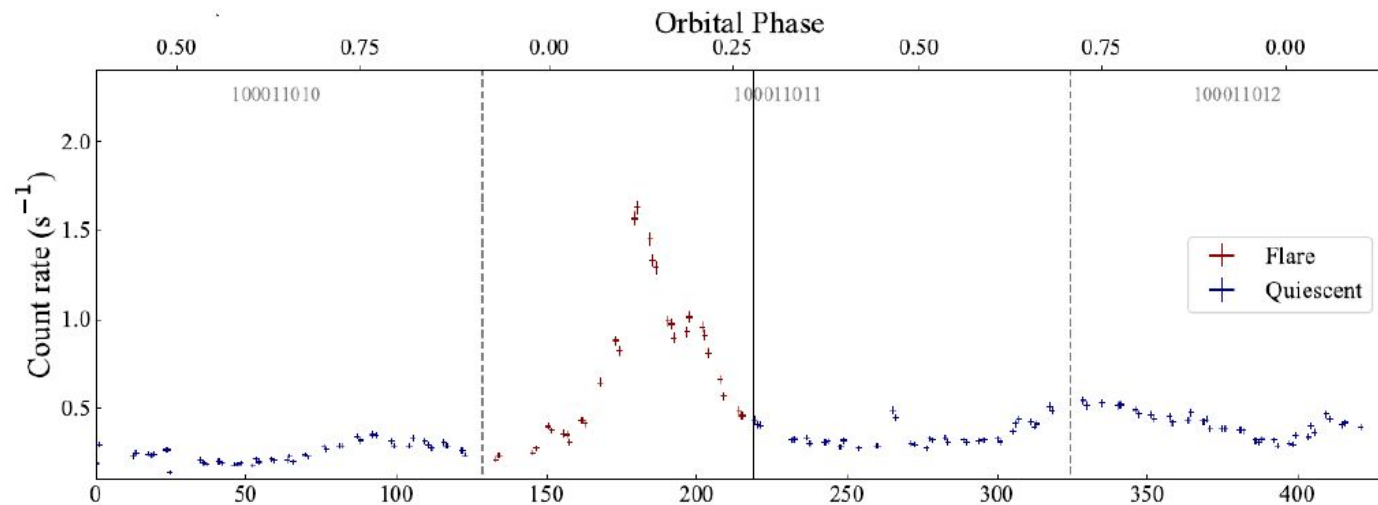


Fluorescence

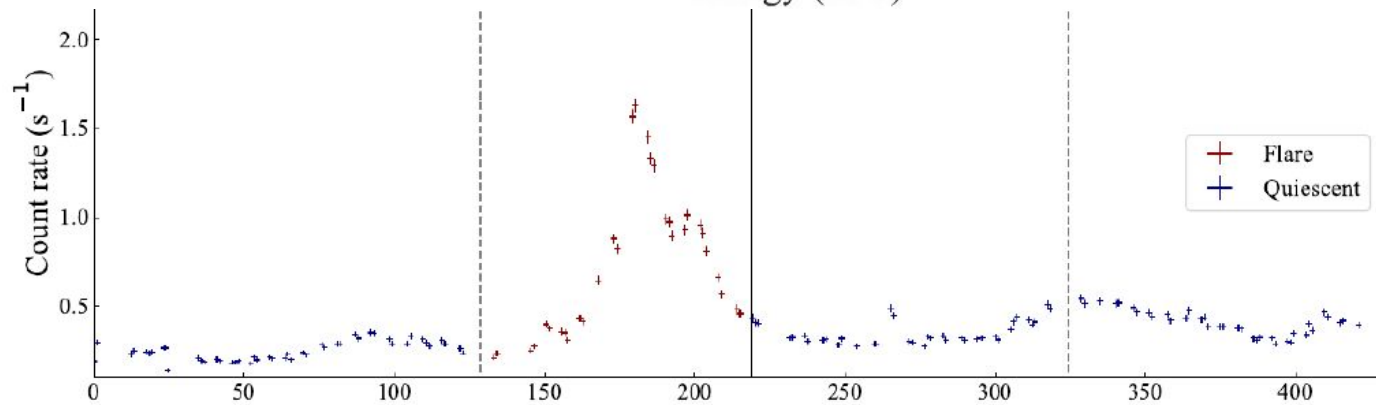
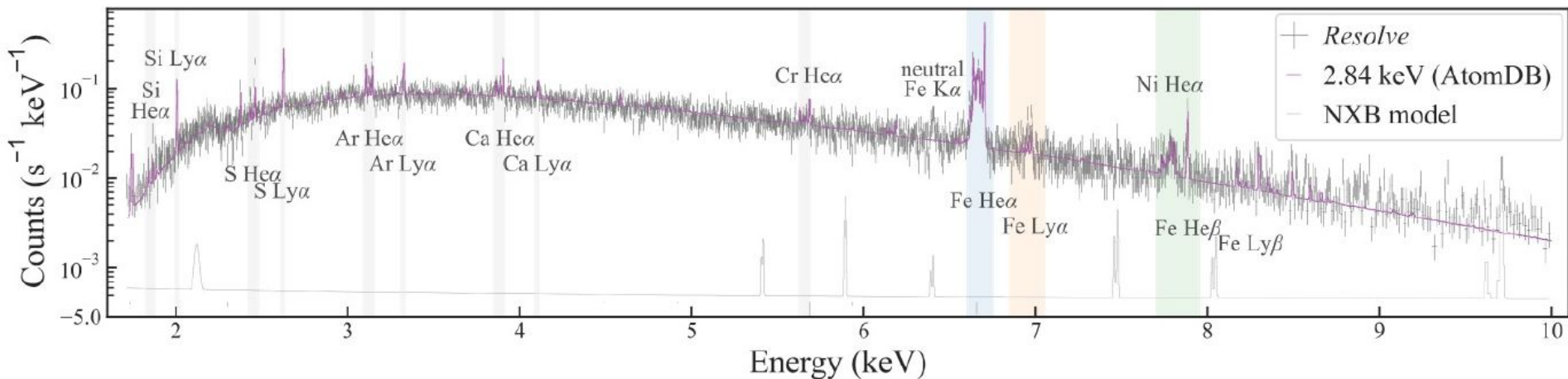


XRISMによる恒星の観測

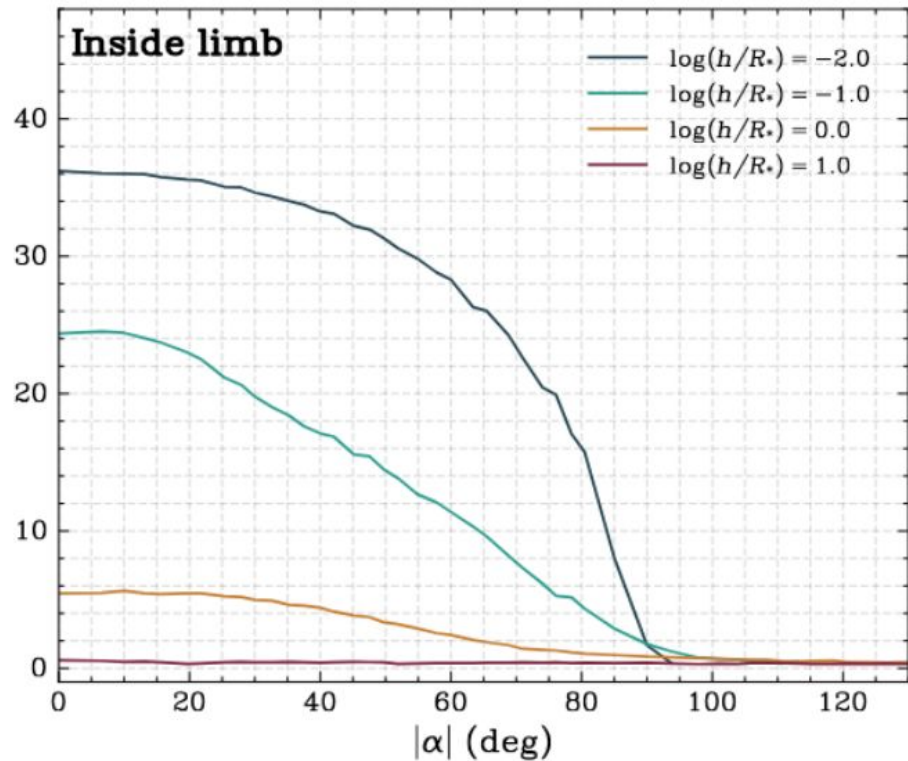
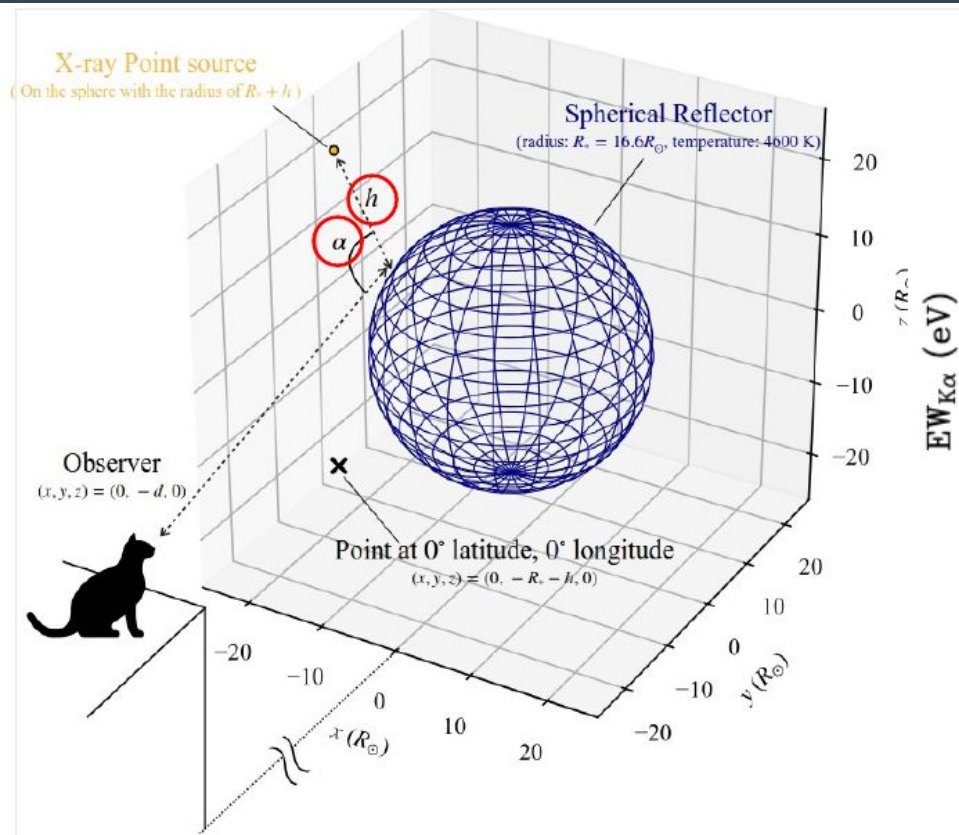
Target	Type	Obs date	t_{exp}	Publications
HR1099	RS CVn	2024-03	272	Kurihara+25b [6] , Kurihara Ph.D. thesis [4]
GT Mus	RS CVn	2024-08	205	Kurihara+25a [5] , Kurihara Ph.D. thesis [4]
σ Gem	RS CVn	2025-11	109	Inoue+26 [1]
AB Dor	Fast rotator	2025-12	351	
β Per	Algol	2026-02	284	



XRISMによる恒星の観測



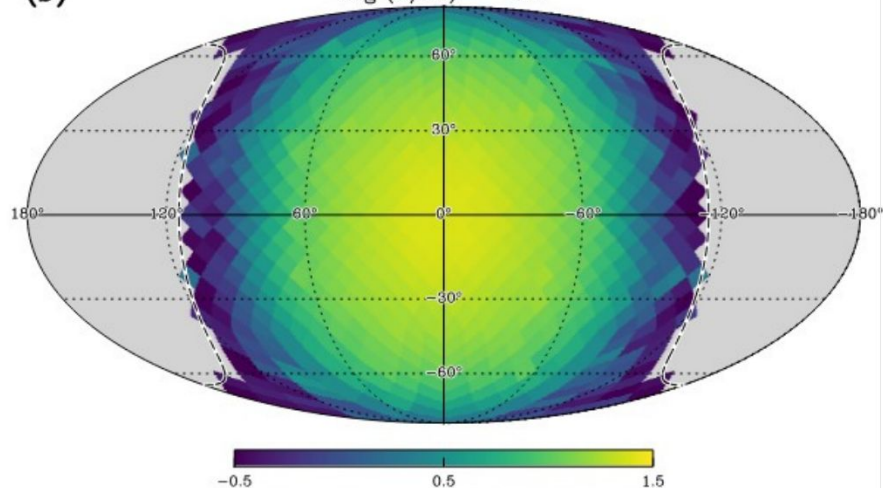
蛍光X線マッピング



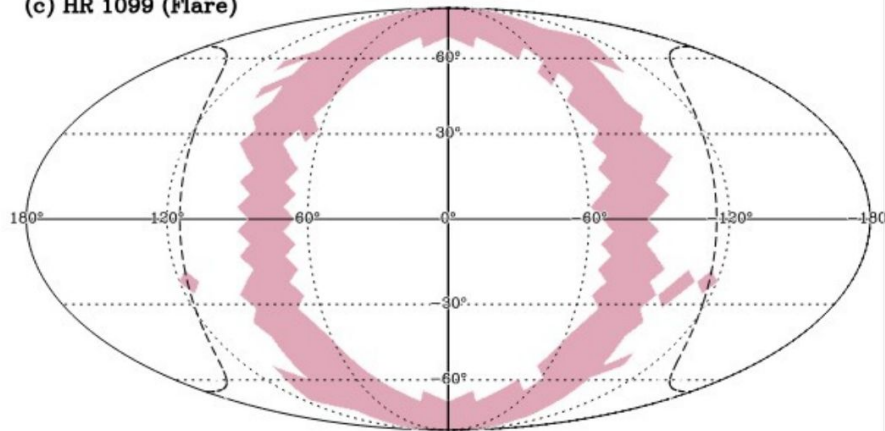
蛍光X線マッピング

(b)

$\log(h/R_\odot) = -1.0$



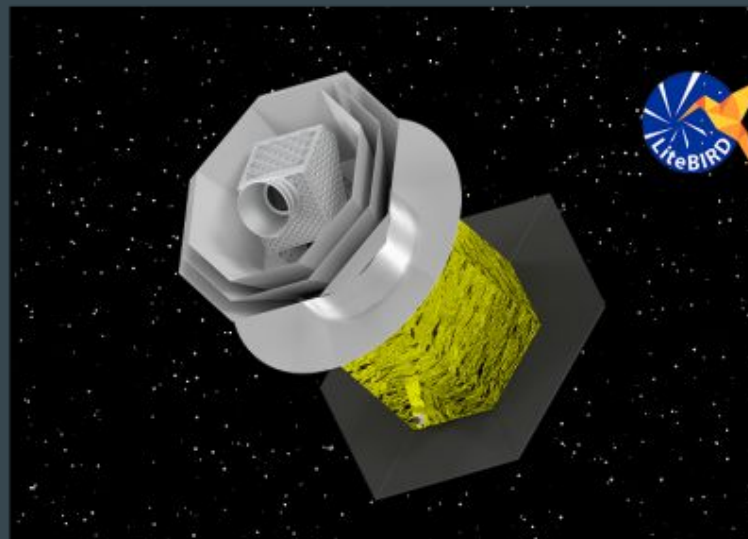
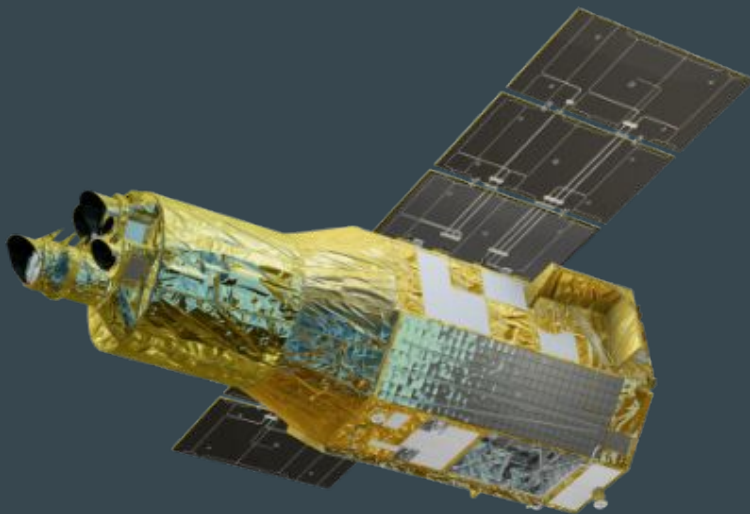
(c) HR 1099 (Flare)



輻射輸送計算(左)との比較で、点にしか見えない遠方の恒星の表面の情報(右)が得られる！

内容

1. XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission)
2. LiteBIRD (Light spacecraft for the study of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)

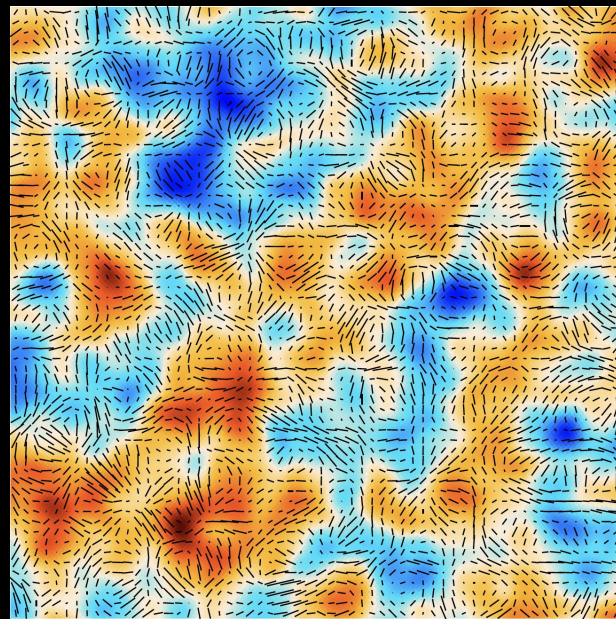
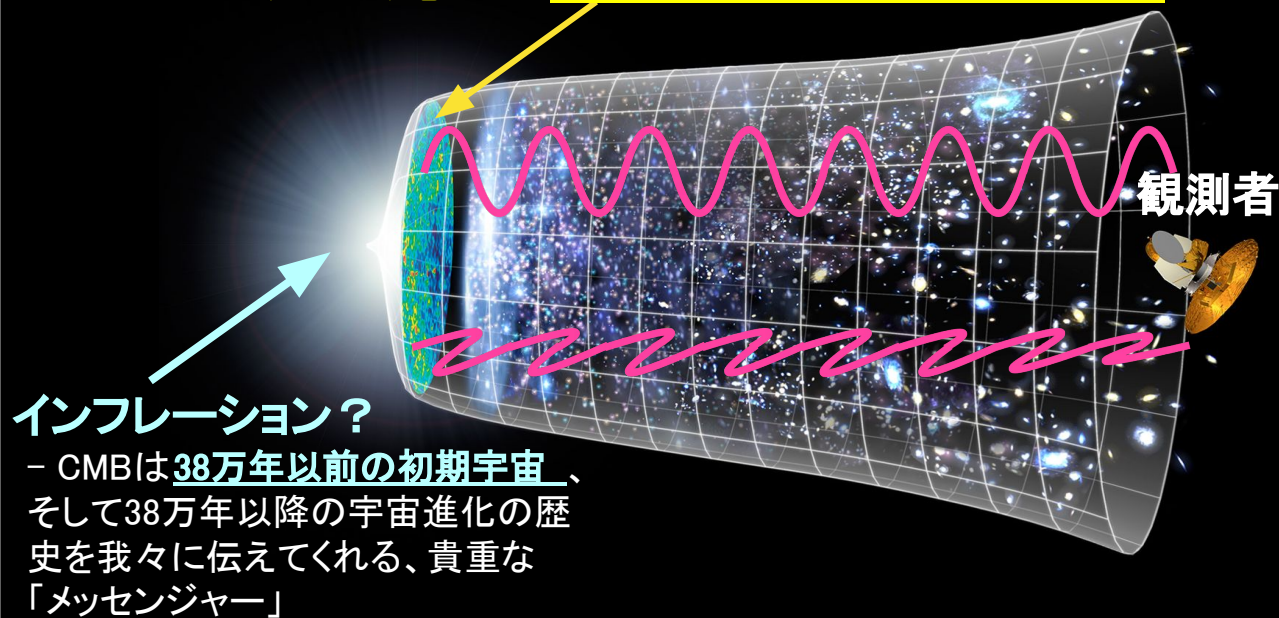


ビッグバンの残光:宇宙マイクロ波背景放射:(Cosmic Microwave Background = CMB)

宇宙の晴れ上がり(38万年, 3000 K, $z=1100$)

- CMB光子は、電子とのトムソン散乱によって直線偏光する!

観測対象:CMBの直線偏光



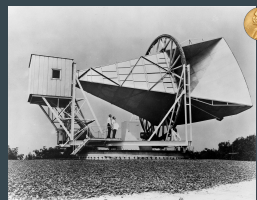
宇宙の始まり

現在(138億年, 3 K, $z=0$)

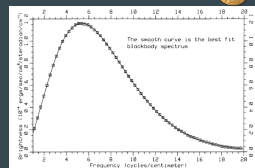
なぜCMBを観測するのか？ 宇宙論と天文学に関する情報の宝庫

- 宇宙の年齢や組成(暗黒物質や暗黒エネルギーの存在量)に関する詳細な情報は、CMBの温度異方性の測定から得られた。**CMB温度異方性の観測は、宇宙論の黄金時代を牽引してきた**。宇宙論の標準モデルである Λ Cold Dark Matter(Λ CDM)モデルが確立できたのは、まさにCMB観測があったからこそである。
- 1992年にCOBE衛星が温度異方性を発見して以来、過去35年間で、CMBの測定精度は飛躍的に向上した。**宇宙と地上からの観測は、車の両輪** のようにしてCMB観測の爆発的な進歩を支えてきた。
- 次のステップは、**偏光の測定**。LiteBIRDは、**偏光観測を主目的として設計** された世界初のCMB宇宙望遠鏡である。

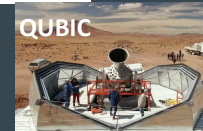
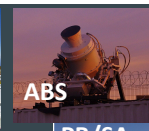
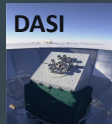
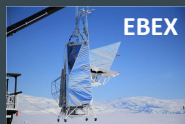
CMBの発見 (1964)



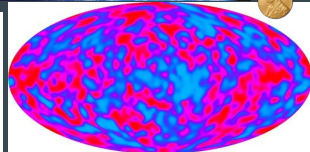
衛星による観測



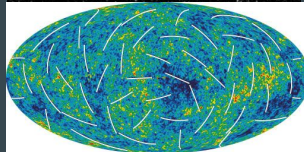
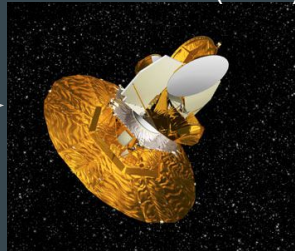
地上・気球
望遠鏡による観測



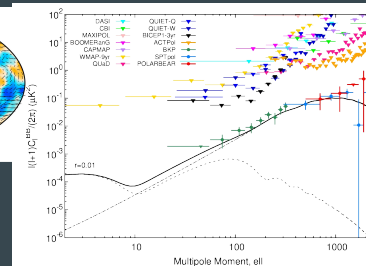
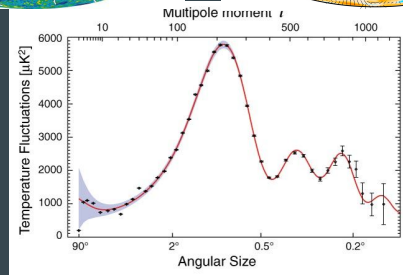
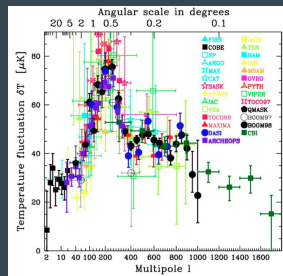
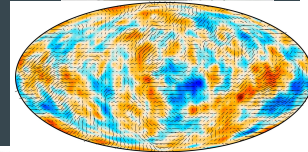
NASA COBE (1989)



NASA WMAP (2001)



ESA Planck (2009)

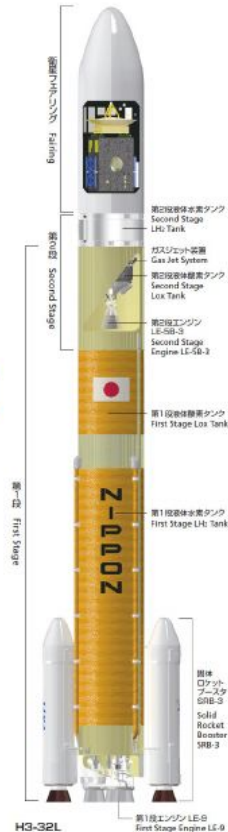
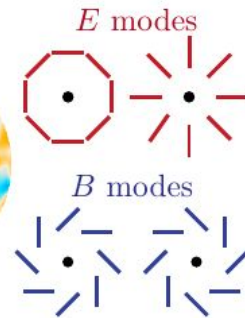
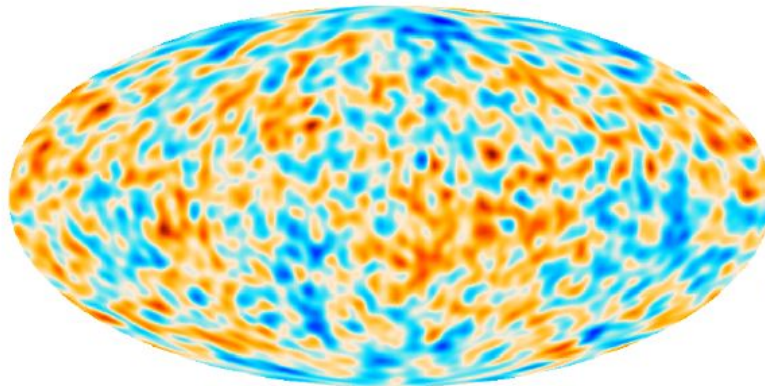
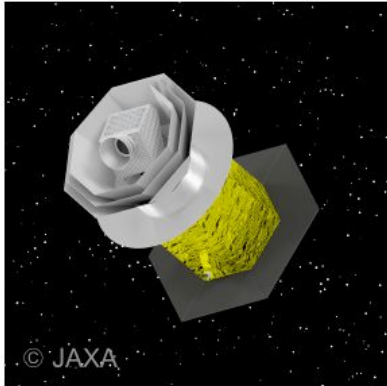


LiteBIRD overview



- Lite (Light) spacecraft for the study of *B*-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection
- JAXA's L-class mission was selected in May 2019 to be launched by JAXA's H3 rocket on JFY2036
- Scientific goals: create all-sky, multi-band ultra-sensitive **microwave polarization maps**, test **inflationary models** through the measurements of **primordial gravitational waves**, and provide new insights into cosmology, particle physics and astrophysics
- **All-sky 3-year survey**, from Sun-Earth Lagrangian point L2
- Large frequency coverage (**40–402 GHz**) at **70–18 arcmin** angular resolution for precision measurements of the **CMB *B*-modes**
- Final combined sensitivity: **2.2 $\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$**

📖 LiteBIRD collaboration PTEP 2023

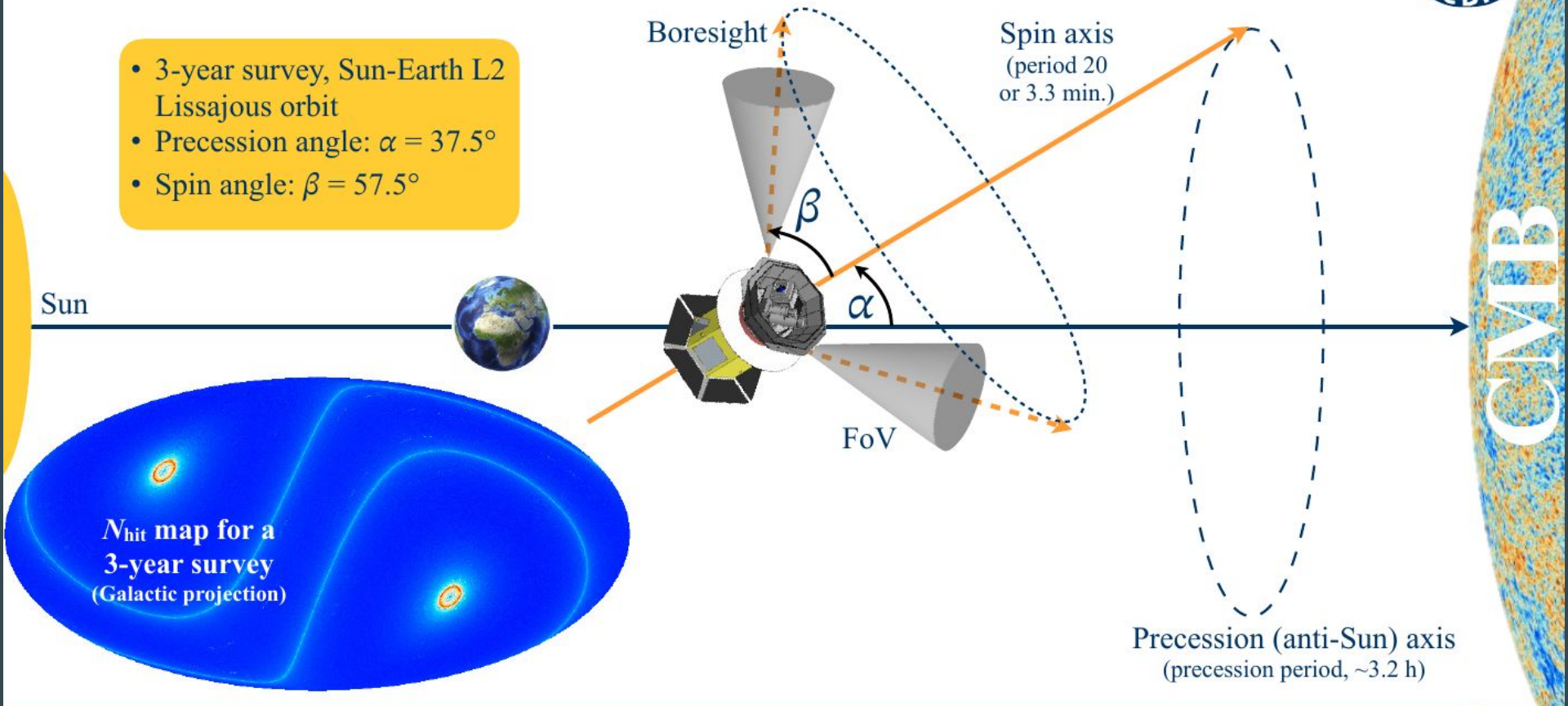


H3-32L

LiteBIRD scanning strategy



- 3-year survey, Sun-Earth L2 Lissajous orbit
- Precession angle: $\alpha = 37.5^\circ$
- Spin angle: $\beta = 57.5^\circ$



LiteBIRD reformation phase



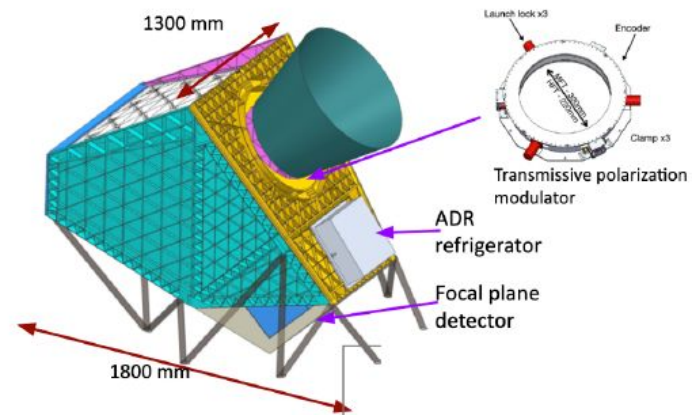
- *LiteBIRD* has been under **rescope studies to consolidate the mission's feasibility while keeping the same scientific objectives**
 - Revisit the error budget
 - **Simplify the mission configuration** (one single telescope instead of three; try to use existing technologies)
 - **Simplify the cryogenic chain**
 - Detectors to be procured by Europe
 - New HWP design based on stacking 6 plates in Pancharatnam configuration, providing large bandwidth
- JAXA Key Decision Point #2 passed successfully (Sept 2025)
- JAXA Mission Definition Review #2 scheduled for July 2026
- Targeted launch date JFY2036
- **Two different configuration options** now being considered, both based on single Crossed-Dragone reflective telescope
- Option 1 (no HWP) requires a faster spin rate to minimize $1/f$ noise
- Option 2 is based on the possibility of using a wider-band HWP

Option 1

- Aperture 500 mm
- 40-570 GHz
- No HWP
- Spin rate 0.3 rpm

Option 2

- Aperture 500 mm
- 40-402 GHz
- Transmissive HWP
- Spin rate 0.05 rpm

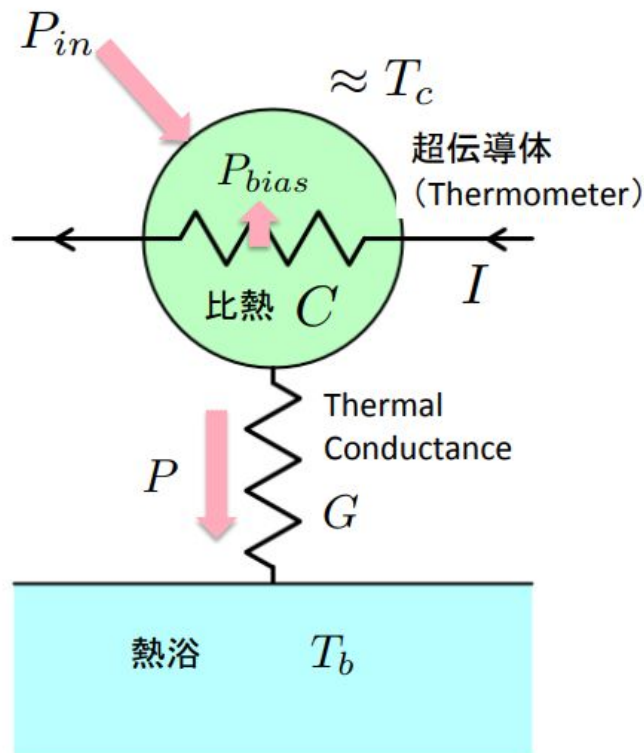


TES

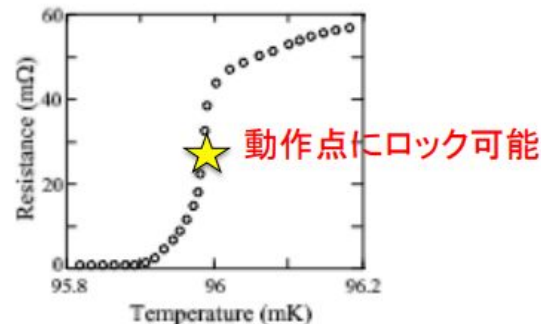
1990年代によく実用化

電気-熱複合系を考え、バイアスのジュール熱でTransition Edge上の適当な点を動作点とする

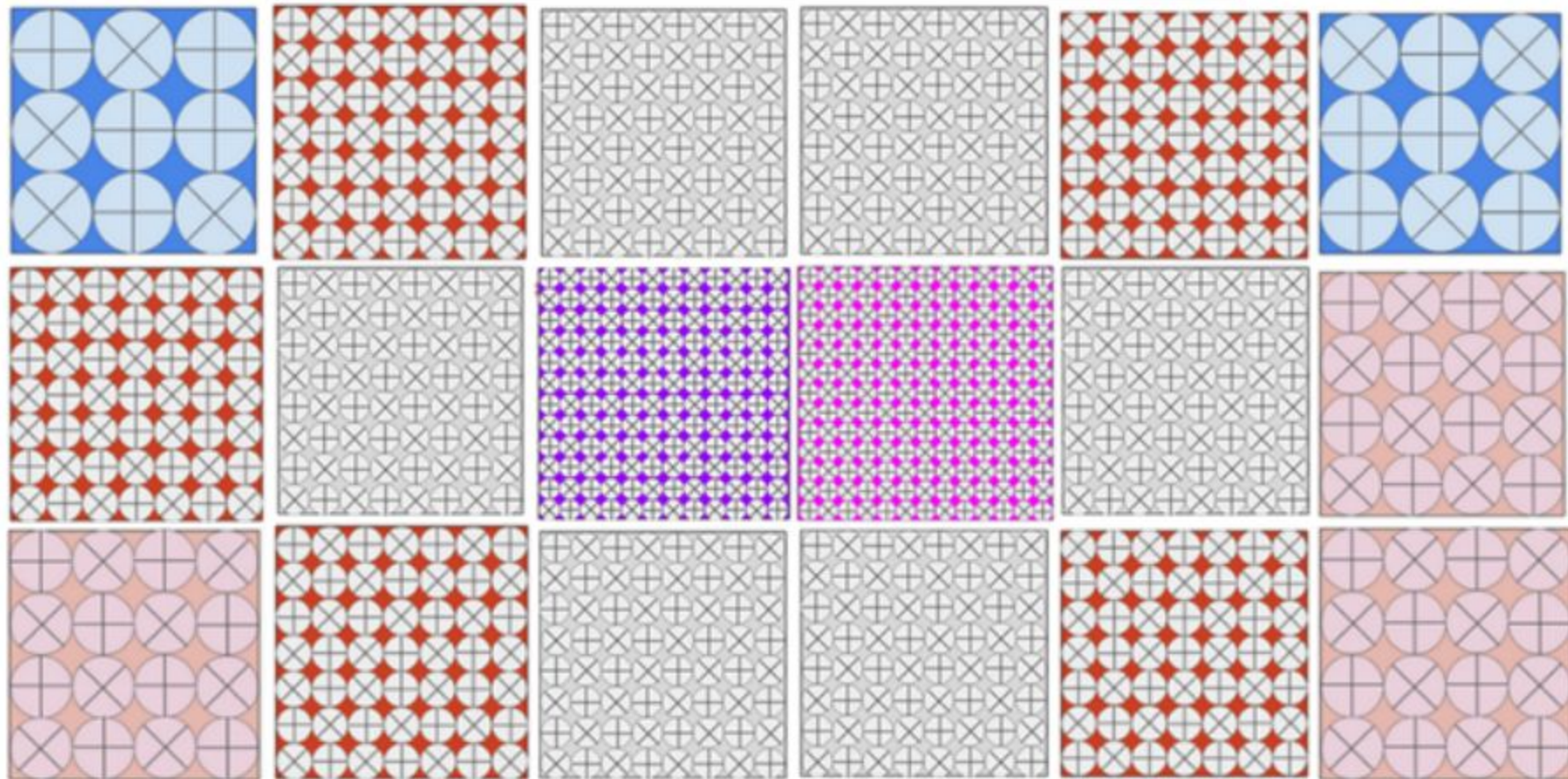
電熱フィードバック法



- 入射するパワーが増加した時
→ 温度が上昇
→ 導体の電気抵抗が増加
→ バイアス電流が低下
→ ジュール熱が減少
- 入射するパワーが減少した時
→ 温度が低下
→ 導体の電気抵抗が減少
→ バイアス電流が増加
→ ジュール熱が増加



Pixel polarization angle orientations



The challenge of B-modes detection

- The *B*-mode signal is expected to have an amplitude at least 3 orders of magnitude below the CMB temperature anisotropies
- *LiteBIRD* is targeting a sensitivity level in polarization ~ 30 times better than Planck
- This extremely good statistical uncertainty must go in parallel with exquisite control of:
 1. **Instrument systematic** uncertainties
 2. **Galactic foreground** contamination
 3. **“Lensing B-mode signal”** induced by gravitational lensing
 4. Observer biases

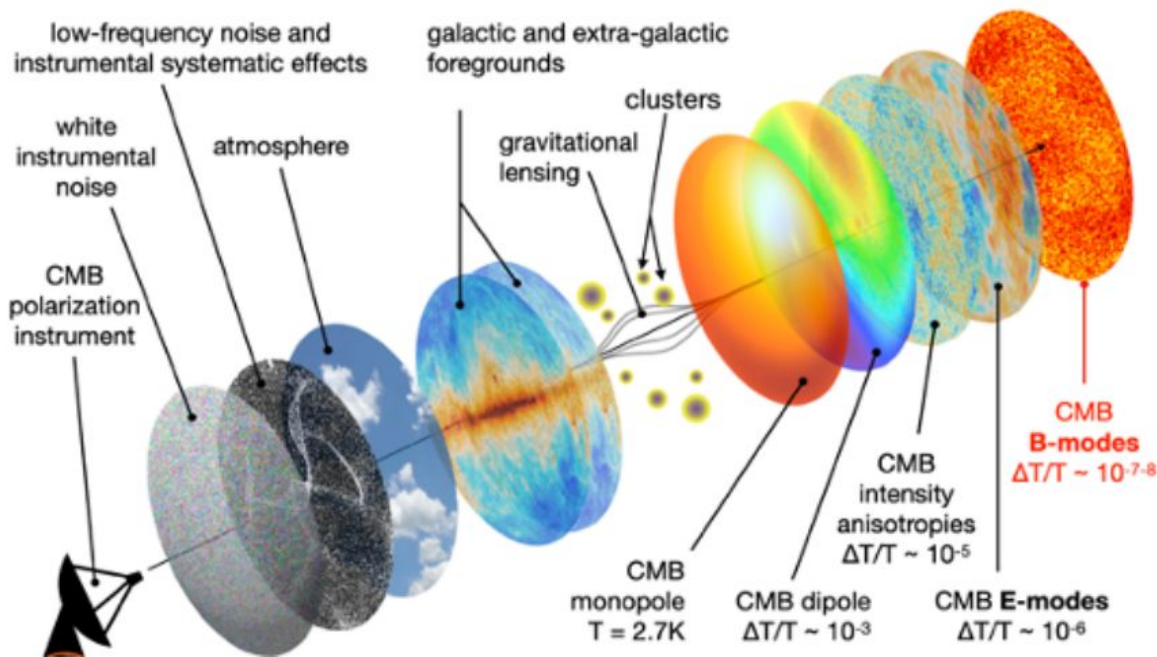


Image credit: Josquin Errard

LiteBIRD Joint Study Group



Around 400 researchers from **Japan**,
Europe and **North America**

Team experience in CMB experiments,
X-ray satellites and other large projects
(ALMA, HEP experiments, ...)



LiteBIRD Global F2F meeting
Jan 26 - 30, 2026 at Kavli IPMU (Tokyo)

内容

1. XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission)
2. LiteBIRD (Light spacecraft for the study of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)

