



超高精度分光で探る 将来X線宇宙物理と太陽物理研究と のシナジー

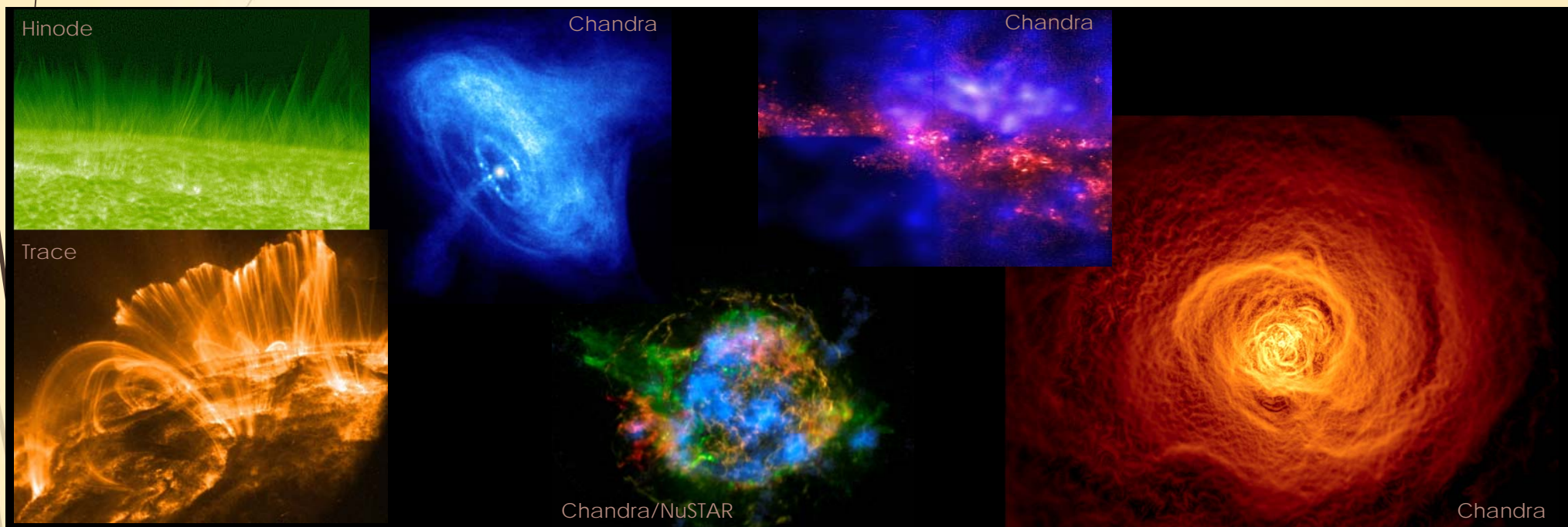
寺田幸功^{1,2}

1. 埼玉大学 理工学研究科/宇宙観測研究センター
2. ISAS/JAXA XRISM Project

X線宇宙物理 & 太陽物理研究

対象天体

様々なスケール、放射過程、物理環境、放射伝播過程、光度、...



科学目標・手法

同じような科学的興味のもと、
共通の物理素過程を扱い、
共通の観測手法を用いてアプローチ、
するものがあるのではなかろうか。

このような共通点を（会場の皆さんと）探す事が本講演の最終ゴール



両分野の科学的課題の比較

高宇連第二期将来検討委員会報告より

天文学：「我々を取り巻く世界の理解し、我々の来し方行く末を知る」
→ 物質世界の姿、現象を捉え、宇宙を支配する根源的な物理法則の検証と解明

X線宇宙物理
太陽物理研究

宇宙の物質・空間の
あり方と起源

Solar-C_EUVST
エネルギー質量
輸送散逸

Carl Fabianの空間分布と相互作用への制限
Miss G. Harington候補であるWHIM探査

宇宙における多様性の発現

重元素量測定による宇宙化学進化と重元素合成
宇宙再電離・銀河と巨大ブラックホール形成
宇宙における粒子加速
GRBで探る最遠方宇宙

PhoENiX
宇宙の粒子加速

物理学の根本原理の追求

ブラックホール近傍観測による極限重力場
中性子星状態方程式の制限

Solar-C_EUVST
宇宙プラズマの
基礎物理過程

→ Solar-C_EUVST や PhoENiX が掲げる課題との重複は大きい



X線宇宙物理の将来計画・まとめ

高宇連第二期将来検討委員会報告より

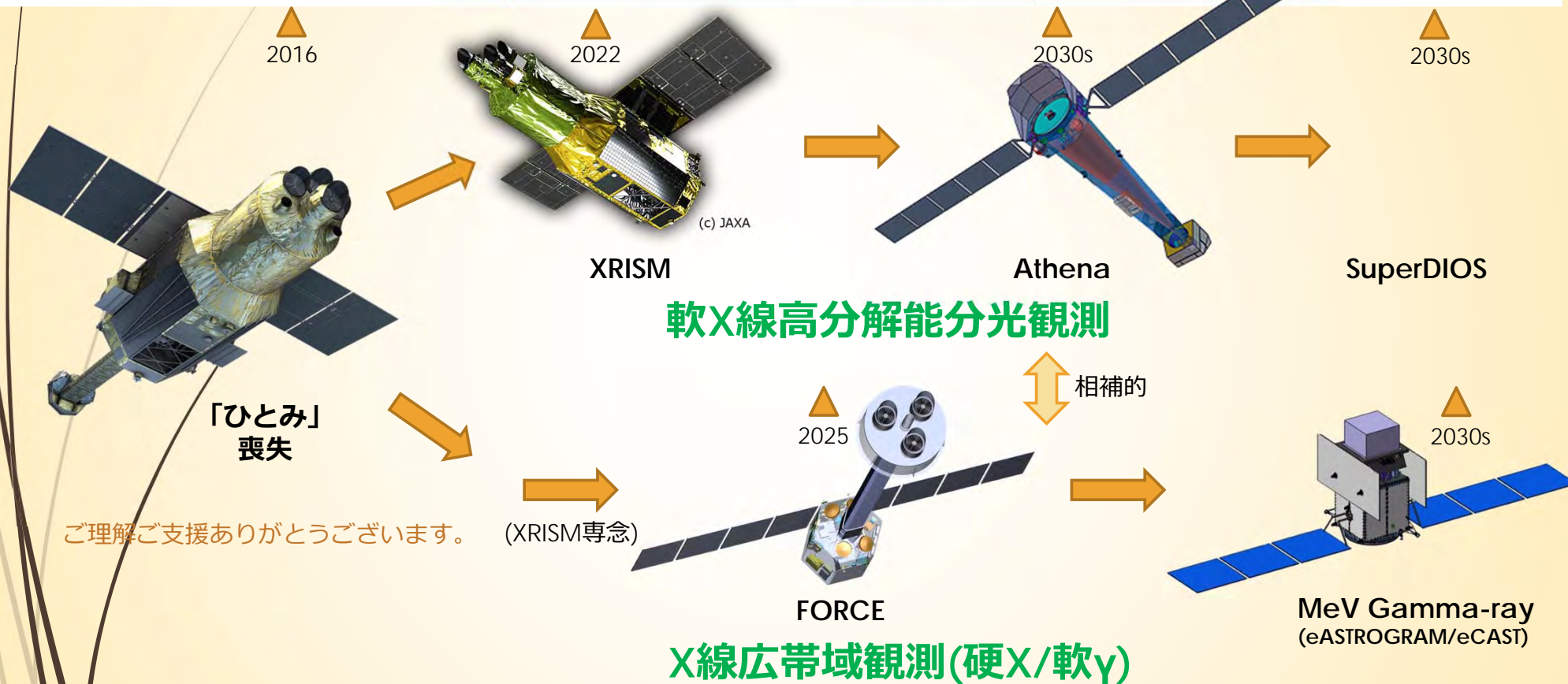
- ✓ 必要手段：軟X線高分解能分光観測、X線広帯域観測、偏光、広視野監視ほか
- ✓ 将来計画：2020年代～2030年代の将来ミッション(中型以上)をマップ
- ✓ 時系列に (次ページ)





X線宇宙物理の将来計画・まとめ

高宇連第二期将来検討委員会報告+より

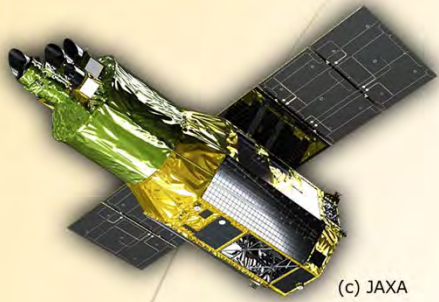


多波長連携

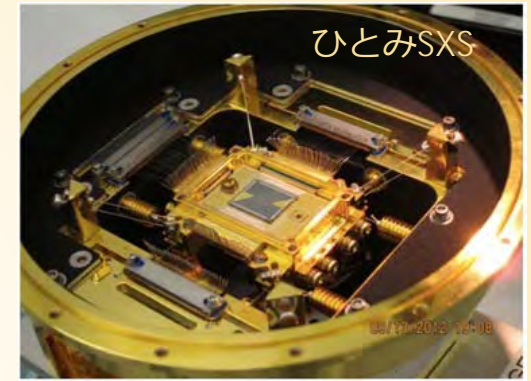
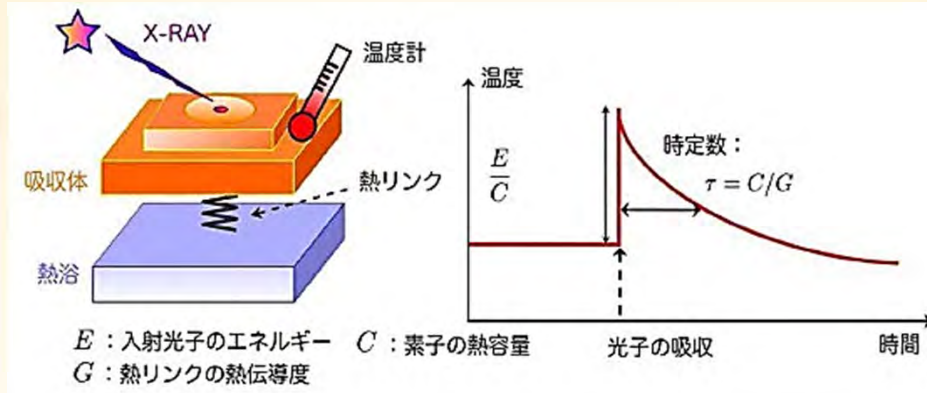
“軟/硬 X線帯域を両輪で”

本講演では軟X線高分解能分光に着目

ひとみ/XRISM マイクロカロリメータ



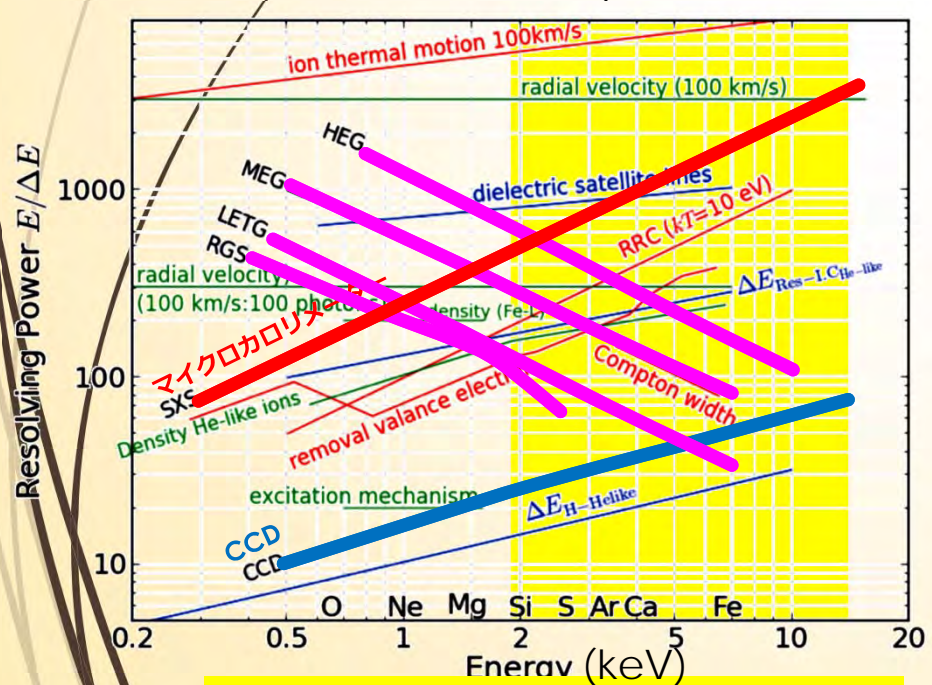
(c) JAXA



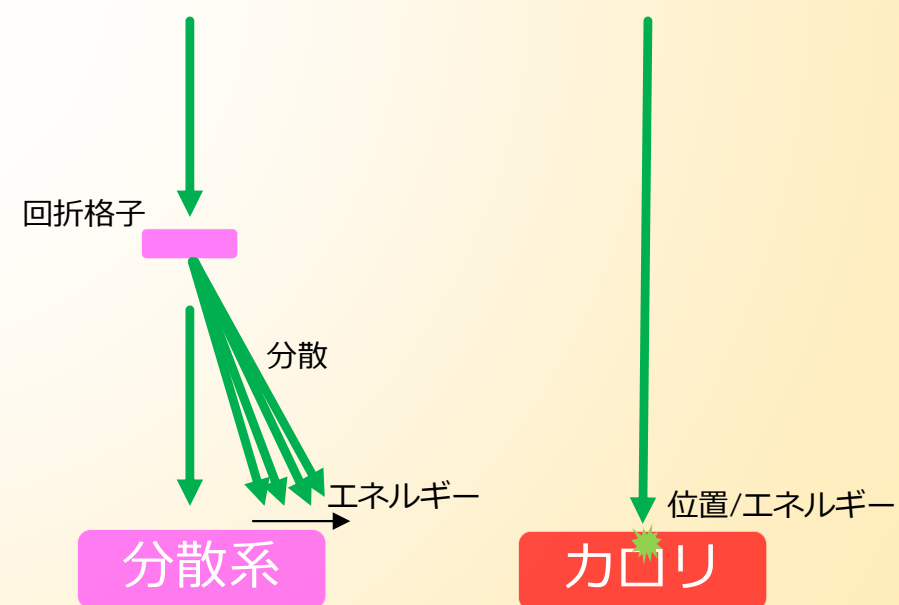
ひとみSXS

- X線のエネルギーをphononで計測
→ 高いエネルギー分解能 ($\Delta E \sim 5-7$ eV @ $E \sim 6$ keV)

- 非分散型分光素子 (撮像と分光, 同時)
※ XMM-Newton RGS, Chandra LETG/HETGとの違い



特に2 keV 以上が特長 (鉄輝線)



拡散光源に有利 (銀河団/超新星残骸 等)



XRISMカロリメータによる超高精度分光

対象：輝線を出す Optically Thin Thermal Plasma or 吸収線となる吸収体

Cooling Curve:

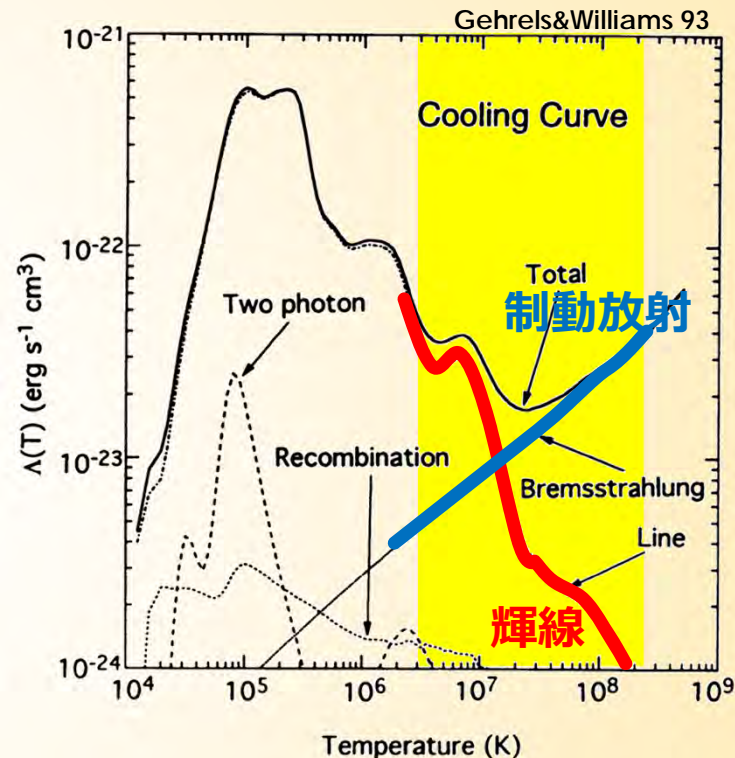
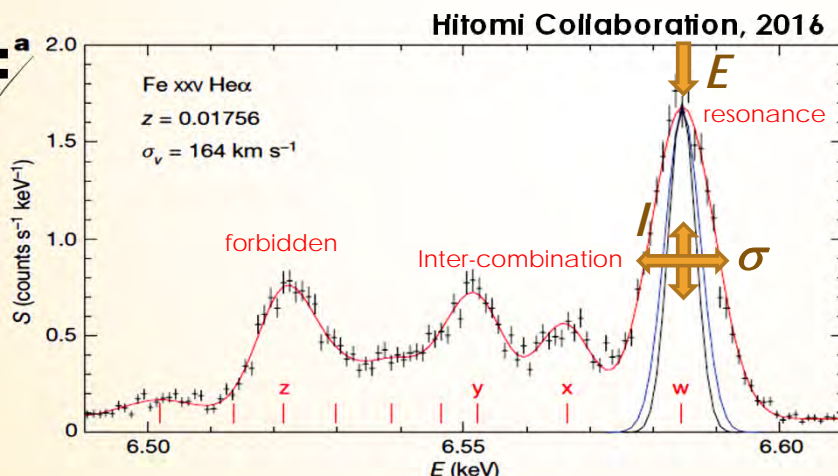
輝線優勢 (高エネルギー側は制動放射優勢)

@ 0.3 – 30 keV (Hitomi/XRISM)

※ Solar-C_EUVST より少し高エネルギー帯

→ 高階電離イオンからの輝線が主

物理量導出

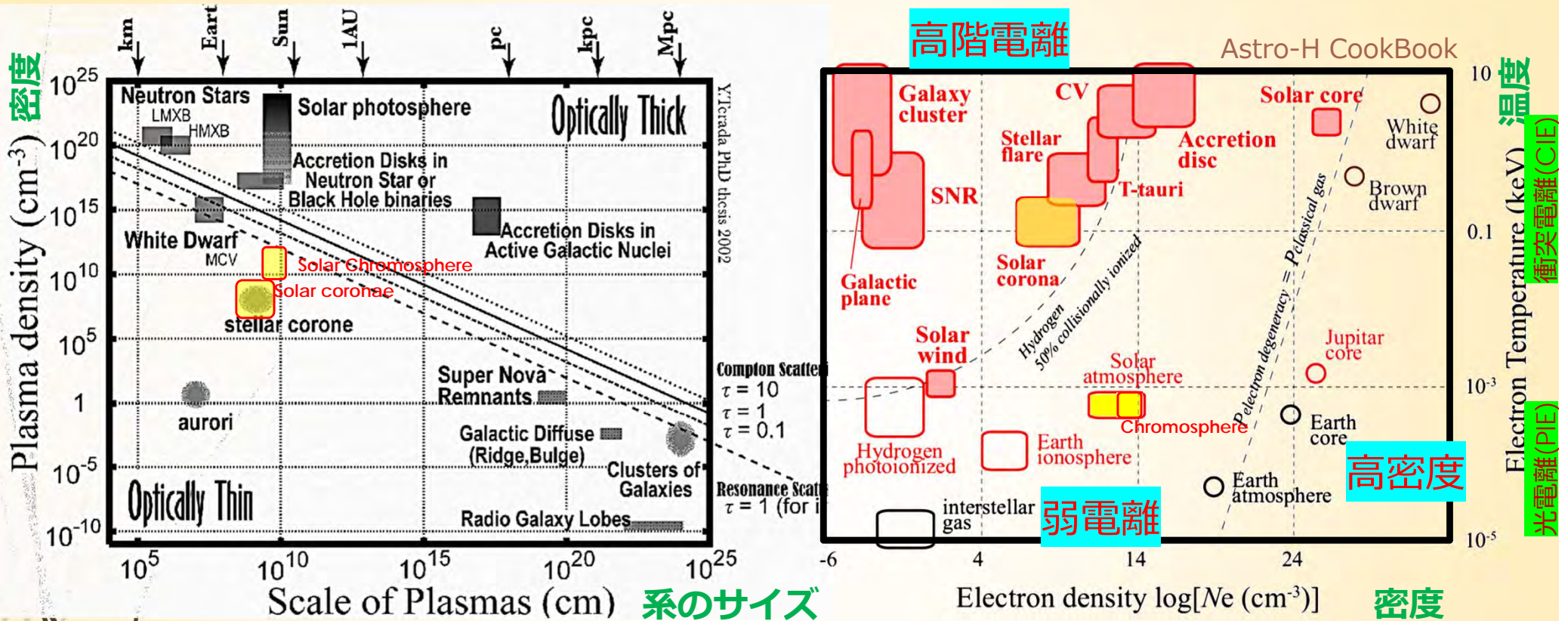


輝線中心エネルギー E	元素/遷移準位, 元素(イオン)のバルク運動(ΔE) etc
輝線幅 σ	乱流, 熱ドップラー, etc
輝線強度 I	電離過程(衝突電離/光電離/再結合; $G=z/(x+y)$, w), 電離平衡度 (nt), イオン温度(kT_i ; He-like/H-like or $G=z/(x+y)$), 密度(n ; $R=(x+y+z)/w$), etc..
時刻 (t)	各物理量の時間発展

“衛星線を用いたプラズマ診断”



X線宇宙物理と太陽物理研究の対象比較



- ✓ 光学的に薄いプラズマ/中間/濃いプラズマ/(高密度)
- ✓ 高温高階電離/低温弱電離
- ✓ 衝突電離平衡プラズマ、光電離平衡プラズマ、非平衡プラズマ
- ✓ 様々なサイズ (∞ 時間変動?)

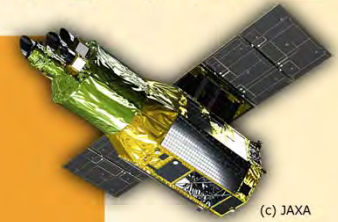
背景の物理素過程は同じながら、物理量が桁で異なる系
太陽大気や彩層もそのひとつ



XRISMカロリメーターで解く科学課題

手法: 宇宙プラズマ診断

光電離/衝突電離, 電離平衡/非平衡
核種, 遷移, アバundance,
バルク運動, 乱流, 熱ドップラー etc + 吸収線



(c) JAXA

Astro-H White Paper & XRISMミッション要求根拠文書

宇宙大規模構造と 銀河団進化	宇宙の 物質循環の歴史	宇宙のエネルギー 輸送と循環	超高分解能分光に よる新サイエンス
銀河団衝突におけるエネルギー散逸, 粘性, 熱伝導 ✓ 衝突銀河団ガスの運動速度計測	超新星のエネルギー散逸 ✓ SNR ガス運動計測 ✓ SNRイオン温度計測 ✓ ほか	銀河/BH共進化 (BHガス供給とトーラスの起源) ✓ トーラス反射X線の輝線幅&乱流測定 ✓ 輝線形状精密化	電荷交換反応 ✓ 衛星線分離 ✓ vs 理論比較
銀河団質量の高精度化 ✓ 質量関数の不定性・銀河団ガス乱流測定	超新星による重元素合成 ✓ 希少元素組成比計測 ✓ 親星星間ガス吸収 etc	AGNフィードバック (BHアウトフロー定量化) ✓ 高階電離輝線吸収 ✓ ガス速度分散計測	共鳴散乱 ✓ 輝線強度の精密計測 ✓ vs. Optically thick放射伝播
銀河団ガス加熱源探査 (AGN Jetの寄与) ✓ 多温度ガス速度計測	銀河風と星形成活動 ✓ 銀河風ガス密度/速度 ✓ 重元素組成計測		再結合プラズマ(電離非平衡プラズマ進化) ✓ 再結合連続成分探査
	銀河・銀河団ガスの重元素汚染(SN I/II 比) ✓ 元素分離・重元素比		低エネルギー宇宙線観測 ✓ 中性鉄輝線診断



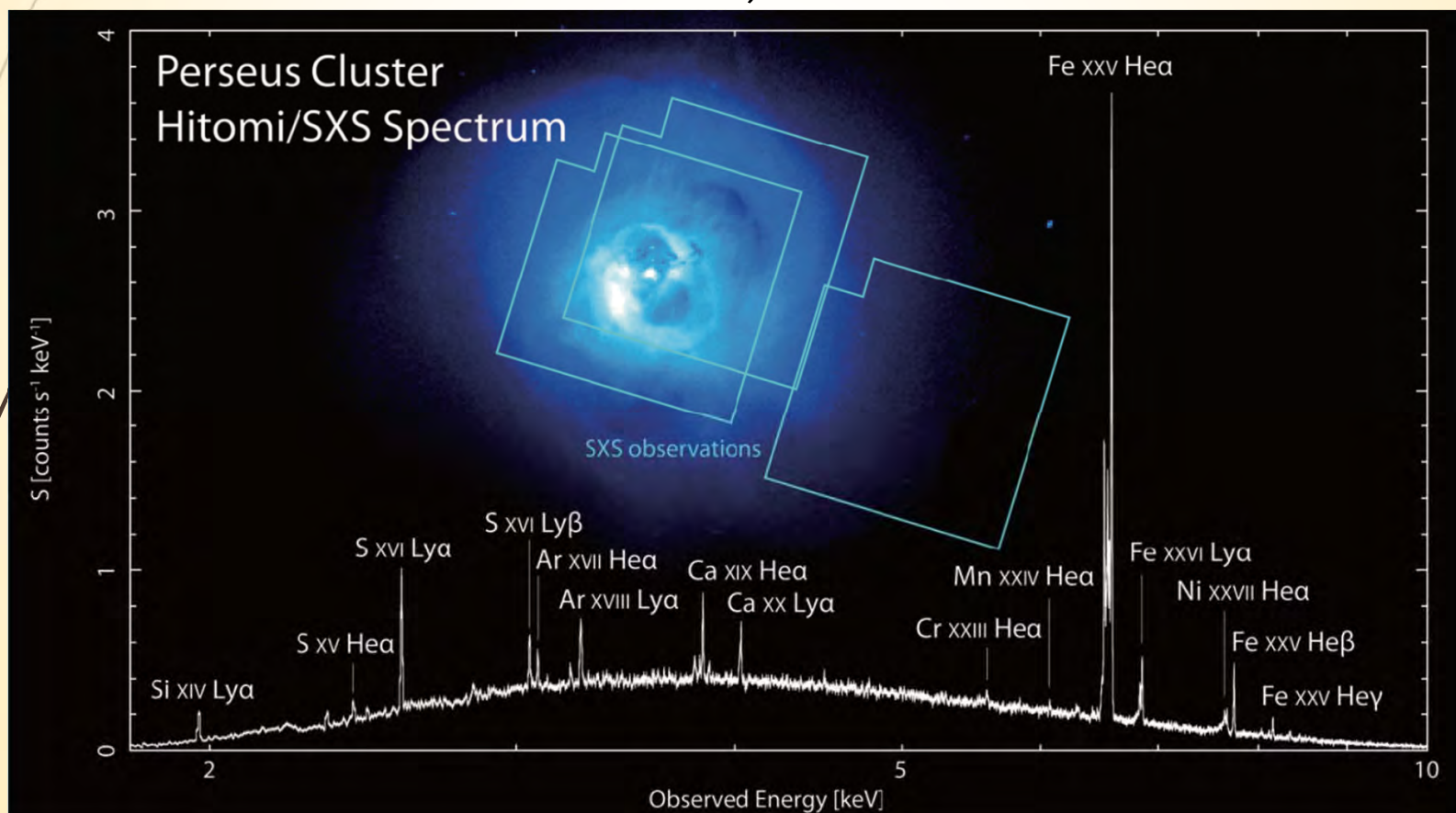
「ひとみ」による科学観測結果 I

「ひとみ」は commissioning phase で喪失したが、
 前述の科学目標に向けた試験観測も行っていた

宇宙大規模構造と銀河団進化	宇宙の物質循環の歴史	宇宙のエネルギー輸送と循環	超高分解能分光による新サイエンス
銀河団衝突におけるエネルギー散逸と熱伝導	超新星のエネルギー散逸	銀河/BH共進化 (BHガス供給とトラスの起源)	電荷交換反応
銀河団質量の高精度化	超新星による重元素合成	AGNフィードバック (BHアウトフロー定量化)	共鳴散乱
銀河団加熱とAGN Jetの寄与	銀河風と星形成活動		再結合プラズマ (電離非平衡プラズマ進化)
	銀河・銀河団ガスの重元素汚染 (SN I/II 比)		低エネルギー宇宙線観測

「ひとみ」ペルセウス座銀河団

(Hitomi Collaboration, 2016, Nature)



輝線幅：AGNフィードバックで予想される乱流よりずっと小さい驚き

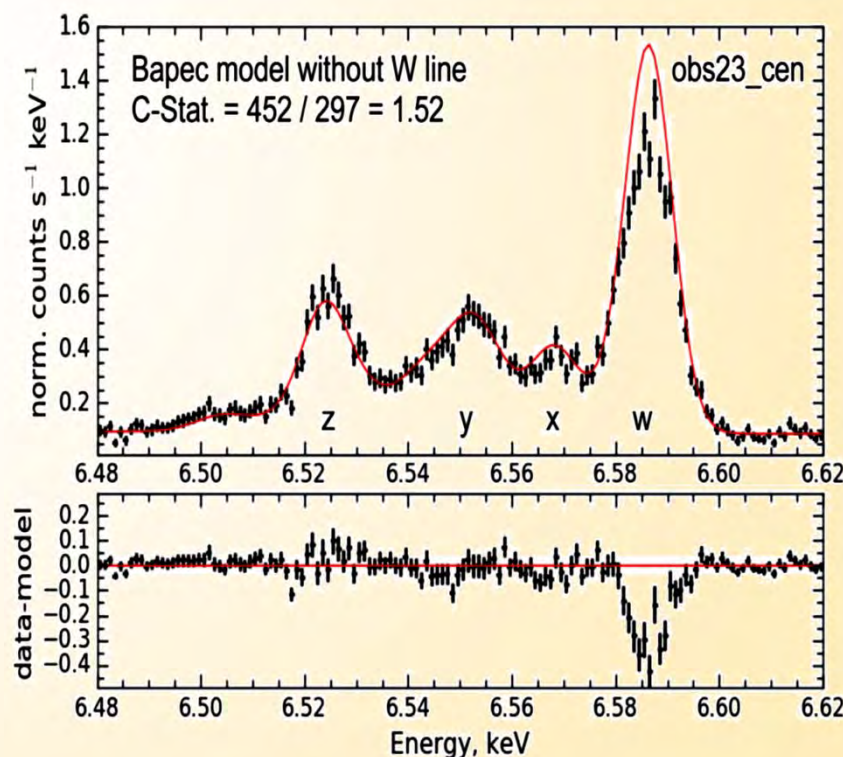
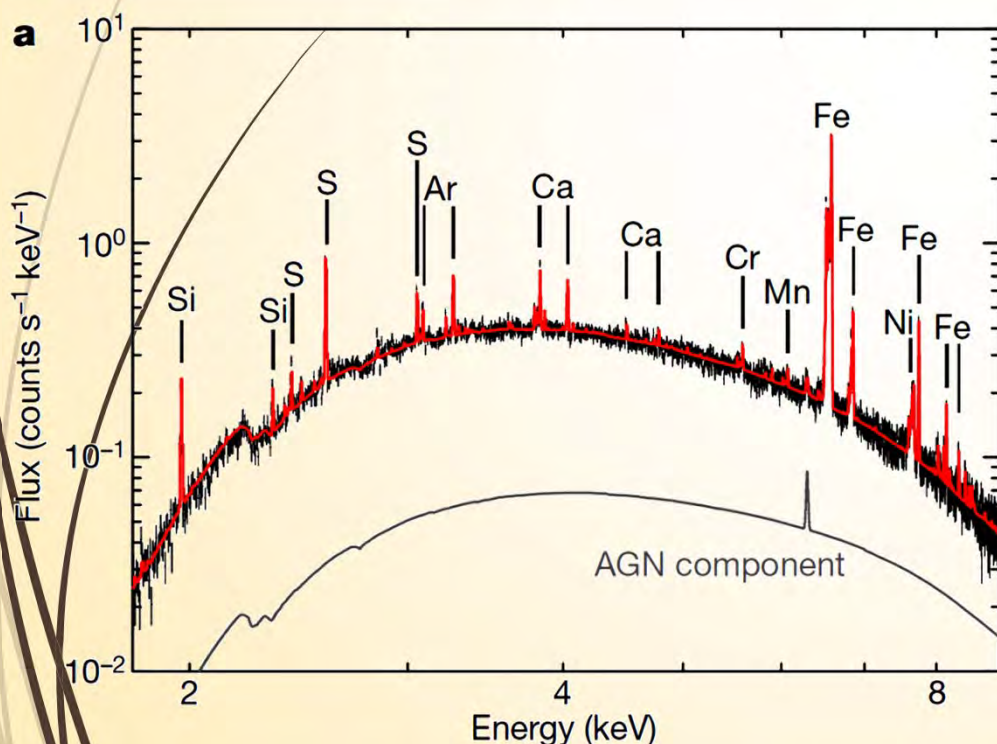


「ひとみ」による科学観測結果 II

「ひとみ」ペルセウス座銀河団: 論文5編

- ✓ Dark Matter annihilation line 制限 (Hitomi+16 ApJ; **Darko**)
- ✓ 鉄族軽元素アバundance (Hitomi+17 Nature; 山口)
- ✓ 共鳴散乱線 (Hitomi+18 PASJ; 佐藤)
- ✓ 銀河団コア温度構造 (Hitomi+18 PASJ; 中島)
- ✓ ガス力学的構造 (Hitomi+18 PASJ; 一戸)

宇宙大規模構造と銀河団進化	宇宙の物質循環の歴史	宇宙のエネルギー輸送と循環	超高分解能分光による新サイエンス
銀河団衝突におけるエネルギー散逸、粘性、熱伝導	超新星のエネルギー散逸	銀河/BH共進化 (BHガス供給とトラスの起源)	電荷交換反応
宇宙線の加速	超新星による重元素合成	AGNフィードバック (BHアウトフロー定量化)	共鳴散乱
銀河団ガス加熱源探査 (AGN Jetの寄与)	銀河団と星形成活動		再結合プラズマ (電離非平衡プラズマ進化)
	銀河・銀河団ガスの重元素汚染 (SN I/II 比)		低エネルギー宇宙線観測



- ✓ Commissioning Phaseの不完全な稼働状態 (Gate Valve Close, MXS off)
- ✓ 1 銀河団のみの観測 → XRISMで recoverしたい課題



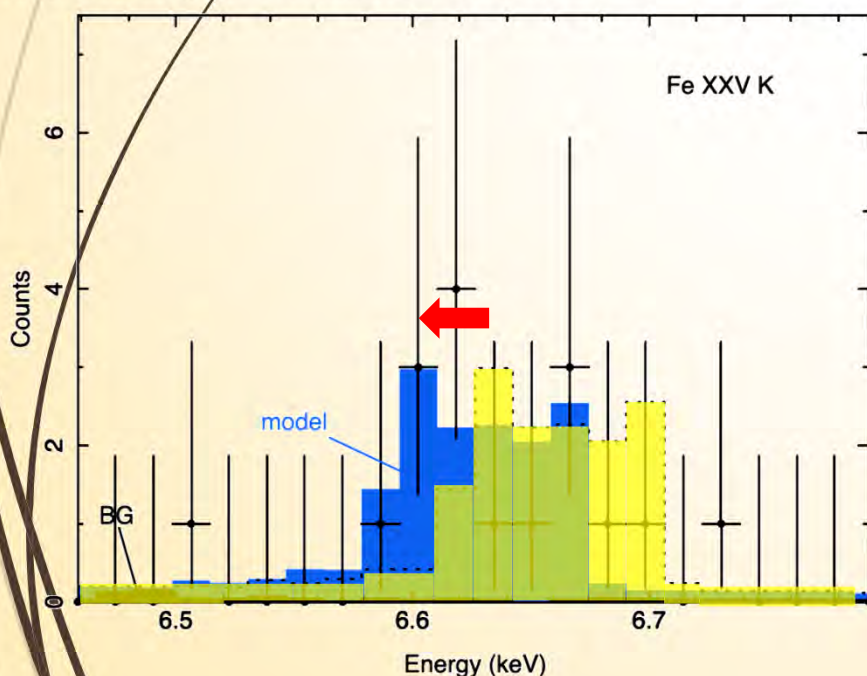
「ひとみ」による科学観測結果 III

「ひとみ」は銀河団以外にも観測していた。

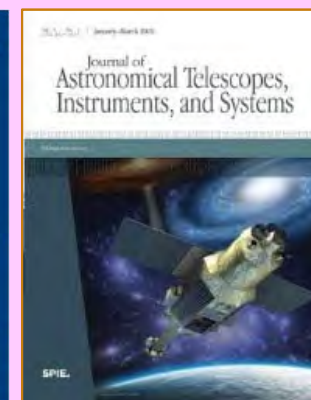
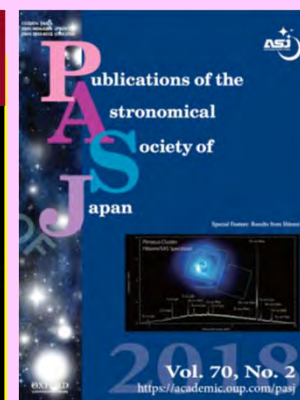
- ✓ 電波銀河, NGC1275: 鉄輝線検出 (Hitomi+18 PASJ; 深沢)
- ✓ LMC SNR N132D: 噴出物の運動 (Hitomi+18 PASJ; Millar)
- ✓ Pulsar Wind Nebula G21.5-0.9: (Hitomi+18 PASJ; 内田)
- ✓ Pulsar Wind Nebula Crab: 熱的吸収線探査 (Hitomi+18 PASJ; 辻本)
- ✓ Crab Pulsar: 電波同時観測 GRP (Hitomi+18 PASJ; 寺田)
- ✓ HMXB, IGR J16318-4848: (Hitomi+18 PASJ; 中嶋)

宇宙大規模構造と銀河団進化	宇宙の物質循環の歴史	宇宙のエネルギー輸送と循環	超高分解能分光による新サイエンス
銀河団衝突におけるエネルギー散逸, 粘性, 熱伝導	超新星のエネルギー散逸	銀河/BH共進化 (BHガス供給とトラスの起源)	電荷交換反応
銀河団質量の高精度化	超新星による重元素合成	AGNフィードバック (BHアウトフロー定量化)	共鳴散乱
銀河団ガス加熱源探査 (AGN Jetの寄与)	銀河風と星形成活動		再結合プラズマ (電離非平衡プラズマ進化)
	銀河・銀河団ガスの重元素汚染 (SN I/II 比)		併用観測による超高分解能分光

SNR (N132D)のFe輝線スペクトル



※ その他、装置開発/校正 30編 (JATIS '18, Hitomi SP)




17光子ながら Doppler Shift を発見 (高分解能分光の威力)

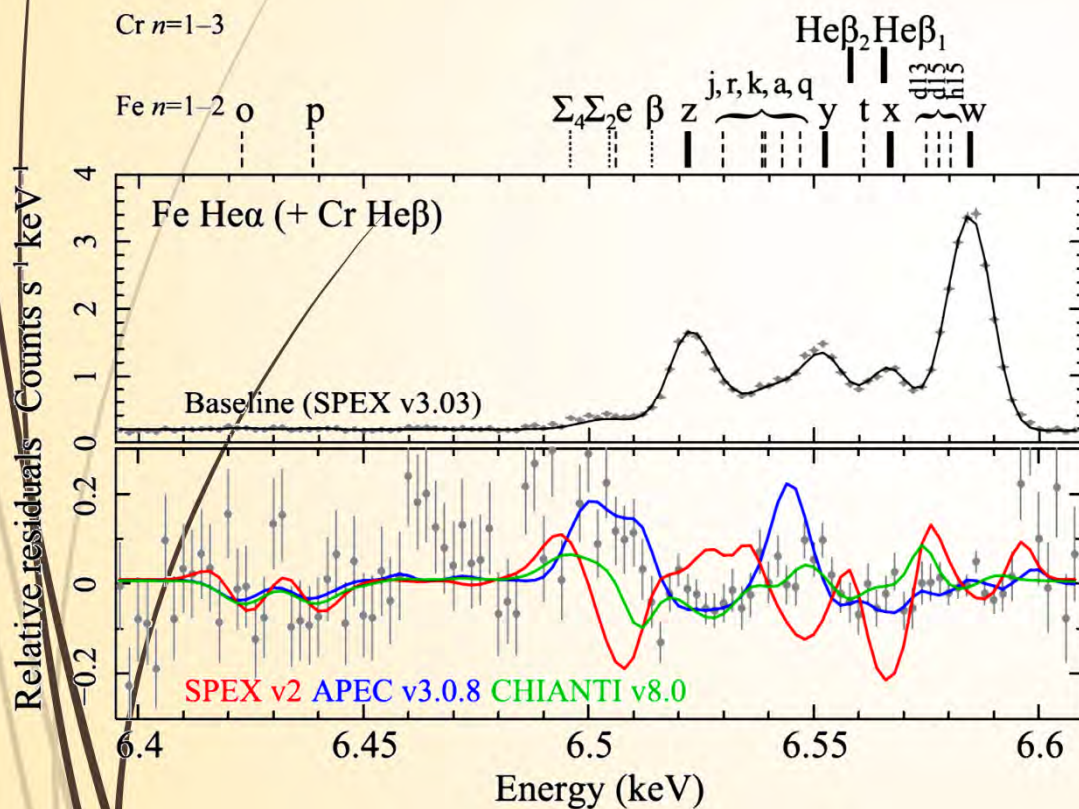


「ひとみ」による科学観測結果 IV

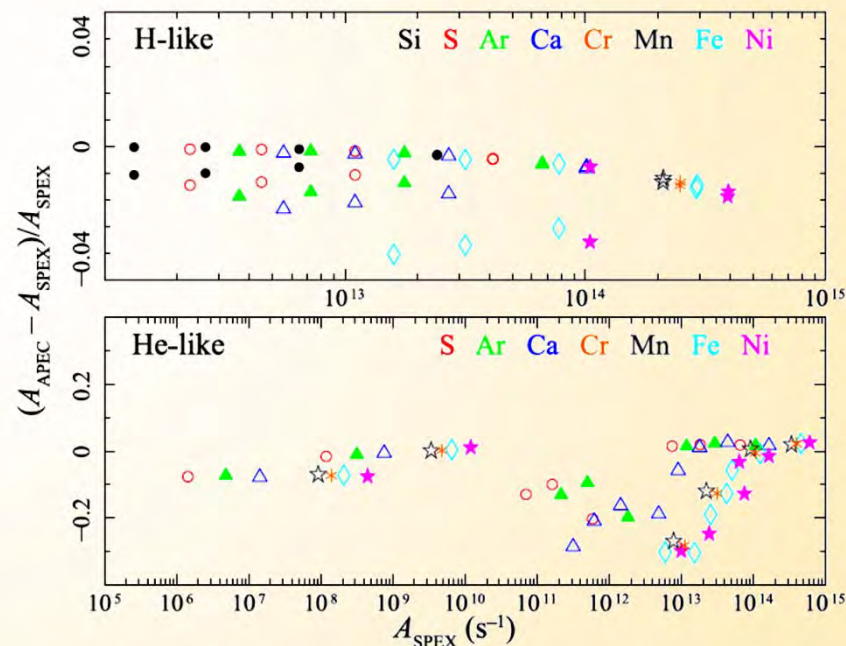
Atomic Data/プラズマ放射モデルへの比較/制限

✓ Hitomi+18 PASJ; 澤田

宇宙大規模構造と銀河団進化	宇宙の物質循環の歴史	宇宙のエネルギー輸送と循環	超高分解能分光による新サイエンス
銀河団衝突におけるエネルギー散逸, 粘性, 熱伝導	超新星のエネルギー散逸	銀河/BH共進化 (BHガス供給とトラスの起源)	電荷交換反応
銀河団質量の高精度化	超新星による重元素合成	AGNフィードバック (BHアウトフロー定量化)	共鳴散乱
銀河団ガス加熱源探査 (AGN Jetの寄与)	銀河風と星形成活動		再結合プラズマ (電離非平衡プラズマ進化)
	銀河・銀河団ガスの重元素汚染 (SN I/II 比)		低エネルギー宇宙線観測



Einstein A係数の比較



観測から Plasma Atomic Model へのフィードバック

「ひとみ」だけではまだ温度、密度、元素が限られたデータのみ提供
 → XRISM (軟X線) + Solar-C_EUVST (極端紫外) で協力できないか？



X線衛星相互キヤル会議, IACHEC

International Astronomical Consortium for High Energy Calibration

IACHEC

International Astronomical Consortium for High Energy Calibration

HOME NEWS WORKING GROUPS MEETINGS WIKI PAPERS RESOURCES SOURCE DATABASE



14th IACHEC meeting

Shonan Village Center (Japan), 20-23 May 2019

The 14th IACHEC workshop will be held at the beautiful Shonan Village Center in Japan, overlooking mount Fuji.

In addition to our usual working group sessions, we will be hosting two special sessions. The first session will focus on the challenges associated with the calibration of future high resolution spectroscopy instruments, and the second on the impact of calibration errors on popular models with a emphasis on the limitations it has on the interpretation of the source physics.

Meeting website: <https://indico2.riken.jp/event/2910/>

Venue website: <http://www.shonan-village.co.jp/eng/>

Scientific program

Monday 20/5

Session I: Calibration status of operational missions - part 1

Chair: Yukikatsu Terada

8:30 - 10:25

8:30-8:45	Yukikatsu Terada & Masahiro Tsujimoto	Welcome
8:45-9:05	Mutsumi Sunizaki	MAXI GSC calibration for 10 years data

News: The 14th IACHEC in Shonan Village in Japan was a success. Talks can be found at 2019

Mission Links

Astrosat
Chandra
Insight-HXMT
INTEGRAL
MAXI
NICER
NuSTAR
Swift
XMM-Newton

Resource Links

HEASARC
SIMBAD
NED
ADS
ArXiv

Search This Site

Search
 www IACHEC

- 各国のX線衛星間の相互キャリブレーションを潤滑に行う事が目的。
- XMM, Chandra, NuSTAR, Astrosat, HXMT, Swift, Integral, NICER, MAXI, eROSITA 等の多数のX線ミッションが参加。
- 有効面積、エネルギー応答関数、バックグラウンド、時刻、同時観測調整、数理統計など、12のWGが活動。「超高分解能分光」もWGの一つ。(寺田は時刻WG chair)

Chandra/Newton も重要

- 2006年から活動を開始し14周年。
- 年一度の年会開催(50-70名程度; 今年(2020)は日本)。
- 日本は「すざく」、MAXI、「ひとみ」で参加。

将来ミッション参加もWelcome.

検出器較正について、

Solar-C_EUVST や PhoENiXの参加可能性は?



まとめ

- X線宇宙物理と太陽物理研究の掲げる科学課題は**重複が大きい**。
- X線宇宙物理の将来計画は、軟X線高分解能分光と硬X線ガンマ線広帯域観測の両輪で進める予定となっている。
- 軟X線高分解能分光観測が対象とするプラズマは、様々な物理量を持つ系ながら**太陽大気や彩層もその仲間である。プラズマ診断の手法には共通点が多い**だろう。
- Plasma Atomic Model への観測的なフィードバックは、**XRISMとSolar-C_EUVST で協力できるのではないか**。
- Calibration や Atomic Model 比較等は、X線衛星国際相互キヤル会議 (IACHEC) で協力しあう事も可能であろう。

ぜひXRISM衛星も利用してください。
(2021年度末打上予定)