

2017年1月5日 第17回 宇宙科学シンポジウム

# ASTRO-Hに対する高エネルギーコミュニティの 総括と今後の方向性について

---

藤本龍一 (金沢大), 田代信 (埼玉大)

# 高エネルギー宇宙物理連絡会 (高宇連)

---

- 高エネルギー宇宙物理学の研究の発展を目的とする団体
  - 飛翔体を用いてX線やガンマ線で天体観測を行なっている研究者＋関連分野の研究者
- 目的・役割
  - 研究者の議論に基づく総意として、高エネルギー宇宙物理分野のロードマップを作成し、将来計画を提案する。
  - 推進するプロジェクトに対して、最大の科学成果をあげられるように提言する。
  - 利用者の立場から、共同利用研究所等における飛翔体等の開発方針や運営方針について意見する。

# 高宇連とASTRO-H「ひとみ」

---

- ひとみは、NeXT計画として検討されていた当初から、高宇連が深く関わってきたプロジェクト。
- 2010年代から2020年代にかけて世界の高エネルギー宇宙物理学を牽引する宇宙X線天文台として、高宇連が強く支持し、多くの会員が貢献してきた。
- ひとみを含め、日本のX線衛星プロジェクトでは、ISASを中心としつつ国内外の大学や研究機関の力を結集して、衛星を打ち上げ、最先端の科学的成果を生み出してきた。

# 「ひとみ」通信途絶以降の高宇連の活動

---

- ・ 3.26 「ひとみ」通信途絶
- ・ 3.31 「ひとみ」通信途絶について、高宇連としてできる限りサポートしていくことを高宇連会長から会員に向けて発信
- ・ 4.19 高宇連内の将来計画各WGへの再検討依頼
- ・ 4.19 「ひとみ」の異常事象に関する小委員会が宇宙開発利用部会に設置される
- ・ 4.28 「ひとみ」運用断念・原因調査開始
- ・ 5.19 「ひとみ」喪失に関する総括のためのタスクフォースの設置準備開始
- ・ 5.31 小委員会において、JAXAが「ASTRO-H「ひとみ」異常事象調査報告書A改訂」を提出
- ・ 5.31 ISAS理工学委員会において、高宇連会長が高宇連の取り組みについて報告
- ・ 6.1 高宇連内にタスクフォースを設置することを高宇連会員に対して宣言
- ・ 6.14 小委員会から宇宙開発利用部会へ報告 (事故原因の公表)
- ・ 7.4 タスクフォースの答申と総括案を高宇連会員に提示
- ・ 7.9 高宇連集会において、ひとみ喪失についての総括を採択→高宇連ホームページで公表
- ・ 7.11 ISAS理工学委員会において、高宇連会長が高宇連の総括報告と代替機提案

# タスクフォース答申と総括

---

- ・ 「ひとみ」喪失に関する総括のためのタスクフォース
- ・ 「ひとみ」プロジェクトに参加した12の主要機関から各1名+高宇連会長
- ・ 審査会・設計会議の記録・調査報告書を読み込んで分析
- ・ 記録に基づき、参加機関(コミュニティから参加したメンバー)の視点で反省・改善提案をまとめて、高宇連運営委員会に対して答申。同時に総括案を提示。
- ・ 高宇連集会において、タスクフォース答申が承認され、会員による議論と修正の後に総括が採択された。

# X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」の喪失に対する コミュニティとしての総括(抄)

全文は以下の高宇連ホームページ参照

<http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/activity/2016/160709/AH喪失についての総括20160709final.pdf>

# 高宇連からのプロジェクト参加者が異常事象に繋がるリスクを認知できなかった要因

- [審査会など各ステップの活用] 段階的プロジェクト計画法にのっとった審査が行われたにも関わらず、このような見落としが生じた一因に、段階ごとの獲得目標に対する理解の不足と、安全・信頼性確保の面での脆弱さがあった。
- [組織的な取り組み] 先端的な観測機器に加えて、バス機器においても高度な指向管理、EOB伸展など、装置開発・運用の両面で挑戦的な提案をしながら、自らの経験・実力を過信して従来のやり方をプロジェクトの大きさに合わせて変えきれず、衛星開発の背景にあるシステムズエンジニアリングの考え方がプロジェクト参加者に対して浸透していなかった。それにより、審査会が十分に機能せず、文書化とその有効利用も不徹底だった。
- [情報共有, リソースの獲得・再配置の普段の努力] プロジェクト全体を俯瞰してリスクを認識し、リソースの徹底的な確保をはかる継続的な努力も不足していた。リソース確保については、プロジェクト内の連携による最適化に加えて、外部からふさわしい人材や文化を導入する努力も十分とはいえなかった。

# 高宇連からのプロジェクト参加者に対する改善提案

---

1. 計画の初期から科学成果の創出に至る道筋を綿密に検討し、プロジェクト参加者が各段階の目標を明確に認識した上で、検証を行いつつ、それぞれの責任分担を着実に進める。
  - A. リスク識別方法の改善とプロジェクト参加者に対する教育
    - ・ 要求・要望の峻別、それに伴うリスクを明確化して、全体でのトレードオフ
    - ・ プロジェクト管理の方法、教訓の学習
  - B. 打ち上げ後の運用および科学成果創出に関する準備と着実な実行
2. コラボレーション全体で情報共有を進め、全体を見渡した判断が重要であるとの共通認識を全員が持つ。 これにより、リソースを開発の進捗にあわせて適切に配置する。
  - C. コラボレーションの分担・責任の明確化と適切なリソースの配置
    - ・ JAXAと大学・機関の連携 (情報開示, エフォートの見える化など)
    - ・ 専門家のサポートが得られる体制
  - D. サブチーム間の連携のための情報共有
    - ・ サブチームリーダ会などによる平素からの課題・情報共有
    - ・ 人事交流

以上の方策をもって、高宇連会員は、衛星プロジェクトに責任を持って参画し、これまで以上の貢献ができるものと確信する。



# 「ひとみ」の科学的成果と今後の方向性

# ひとみの目標と特徴

1) 10個程度の代表的な銀河団において、熱エネルギーを測定し、鉄輝線のエネルギー領域(6キロ電子ボルト)で300km/sの速度分解能の分光性能を実現し、銀河団物質の運動エネルギーを測定する。硬X線帯域で「すざく」の約100倍の感度(\*)で分光観測することで非熱的エネルギーを測定する。

2) 遠方にある10個程度の隠された巨大ブラックホールの候補天体を、硬X線帯域で「すざく」の約100倍の感度(\*)で分光観測し、母銀河との関係を明らかにする。

3) 代表的な数個の活動銀河中心の巨大ブラックホールを、数10キロ電子ボルト程度までの範囲で連続スペクトルを取得し、同時に輝線や吸収線を7電子ボルト程度の分解能で分光測定する。

4) 数個の若い超新星残骸を、硬X線帯域で「すざく」の約100倍の感度(\*)で分光観測して硬X線放射を測定し、電子のエネルギー分布を決定する。巨大ブラックホールにおいては、2から10キロ電子ボルトでのX線強度がかに星雲の1000分の1程度で、べき1.7を持つ巨大ブラックホールのスペクトルを、600キロ電子ボルトまでの帯域で観測可能な感度で、10個以上取得する。

5) 目標1)を達成した後、さらに10倍程度の天体の観測を行って約80億光年までの宇宙(赤方偏移<1)で銀河団内のダークマターの総質量を測定し、総質量と銀河団数の関係を年代ごとに決定する。

## ASTRO-H衛星

硬X線撮像システム  
(HXT+HXI)

軟X線分光システム  
(SXT-S + SXS)

軟X線撮像システム  
(SXT-I + SXI)

軟ガンマ線検出器  
(SGD)

- 軟X線での精密分光
- 硬X線での高感度観測
- 広いエネルギー帯域

# 「ひとみ」の科学的成果

---

- 2月17日から3月26日までの限られた時間ではあったが、「ひとみ」は順次観測装置を立ち上げつつあり、ペルセウス銀河団など、いくつかの天体を観測することができた。
- ペルセウス銀河団の観測ではその性能を発揮し、精密X線分光観測による新たな世界を垣間見せた。
  - Hitomi collaboration, 2016, Nature 535, 117
  - <http://www.isas.jaxa.jp/topics/000282.html>
- 現在チーム全体で、取得したデータの校正と解析に取り組んでいる。

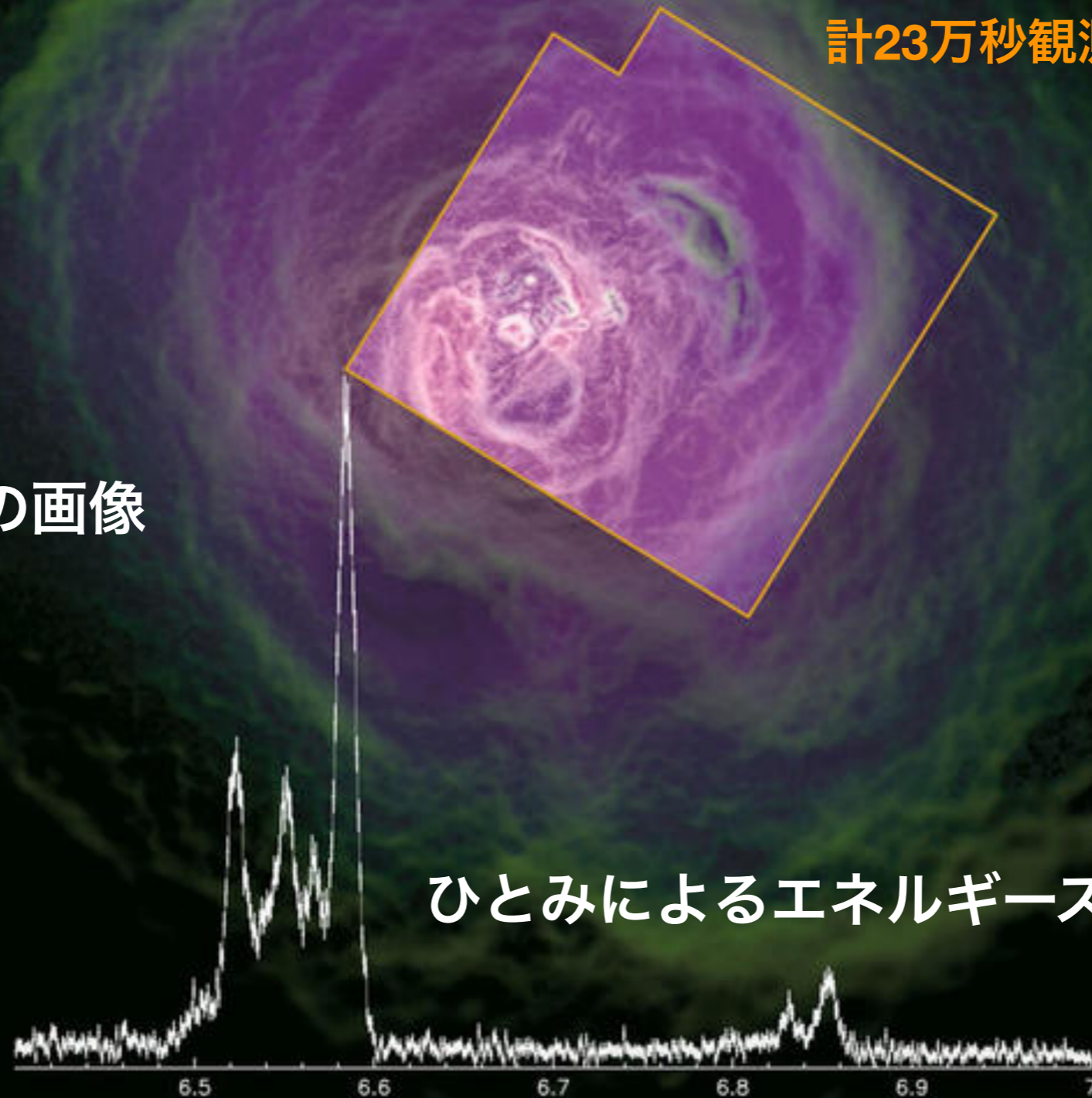
# ASTRO-H 「ひとみ」 搭載軟X線分光検出器による ペルセウス座銀河団中心部の観測

検出器の視野 20万光年×20万光年

2016年2月25-27日, 3月4-6日

計23万秒観測

カラー：  
チャンドラ衛星の画像

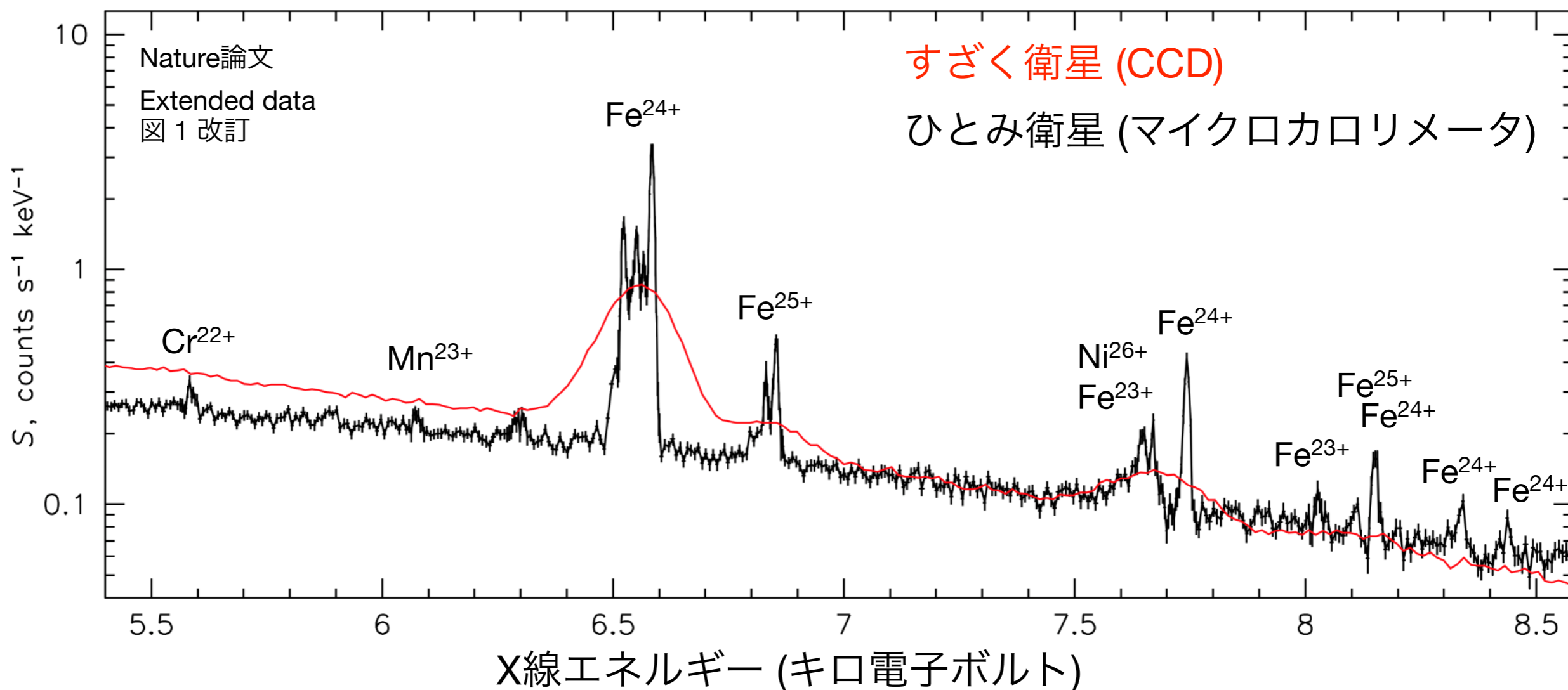


ひとみによるエネルギースペクトル

X線エネルギー (キロ電子ボルト)

# ひとみによるペルセウス座銀河団のスペクトル

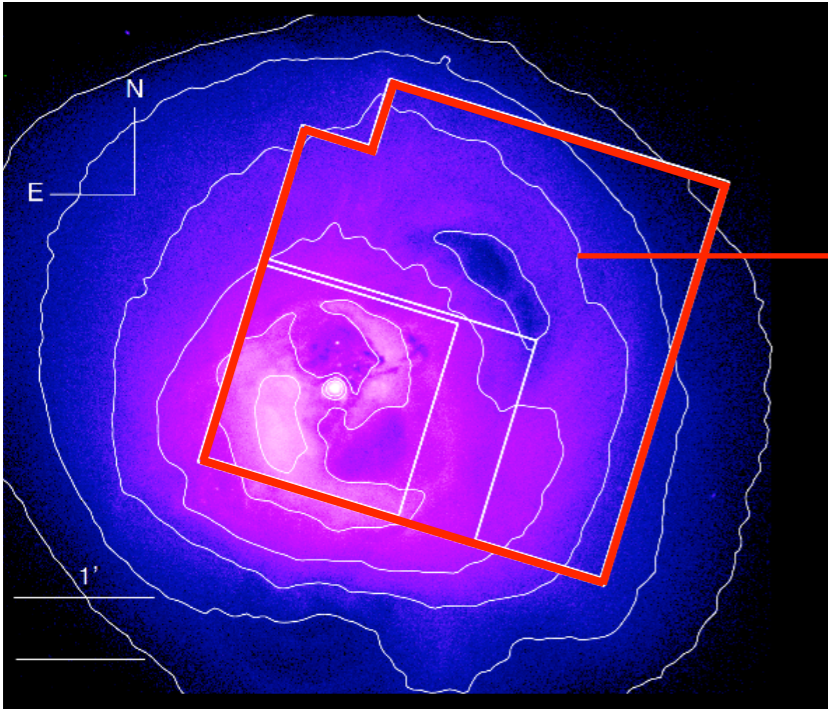
温度5000万度の高温ガスからの放射⇒高階電離した鉄などの特性X線



要求の 7 eV を超え, 5 eV (半値全幅) のエネルギー分解能を達成  
数十 km/s の速度まで測定可能になった

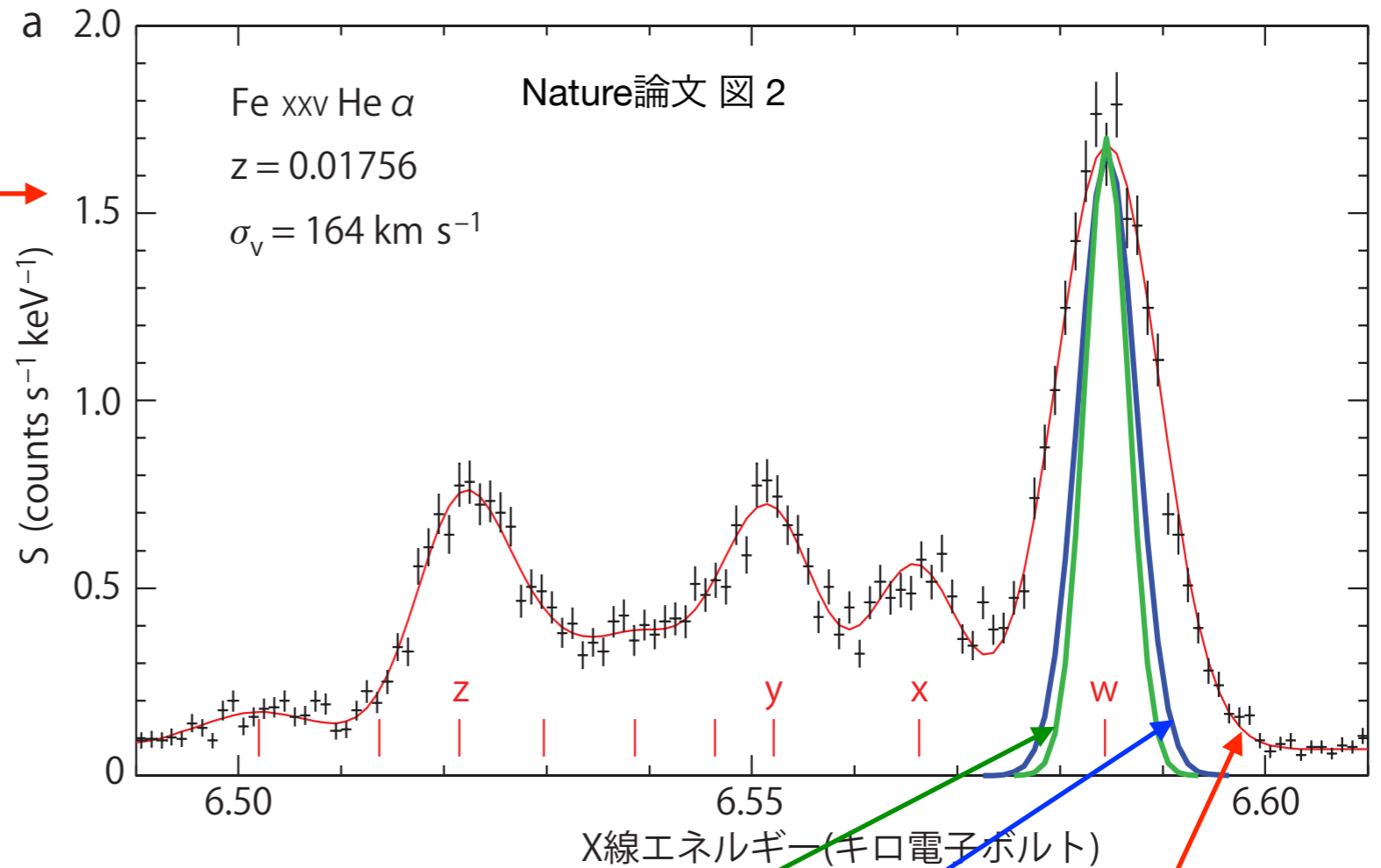
# Fe<sup>24+</sup>輝線群の幅の測定

Nature論文 図 3



チャンドラ衛星画像と  
検出器の視野

銀河団中心の空洞領域を除いた外側



ガスが静止しているとき

鉄イオンの熱運動 (80 km/s)

熱運動 (80 km/s) + ガスの乱雑な運動 (164 km/s)

運動は視線方向の成分. 等方的な速度だとそれぞれ1.73倍

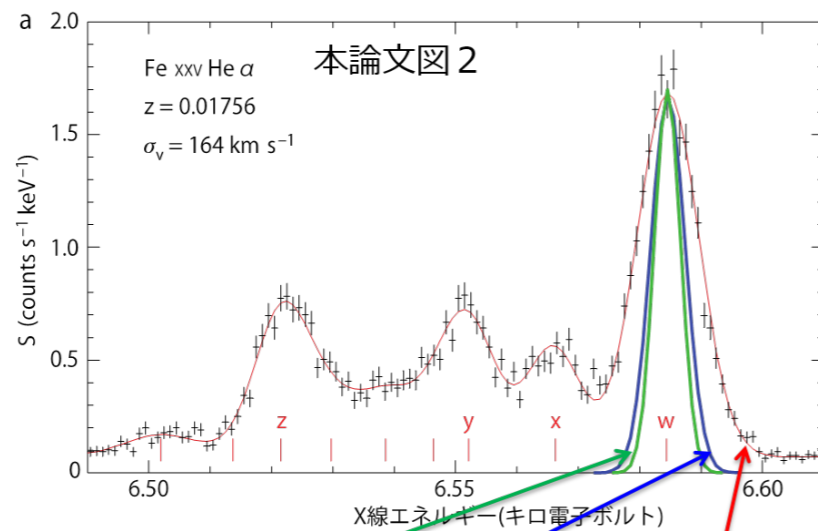
# ひとみの性能で実現すべきサイエンス

---

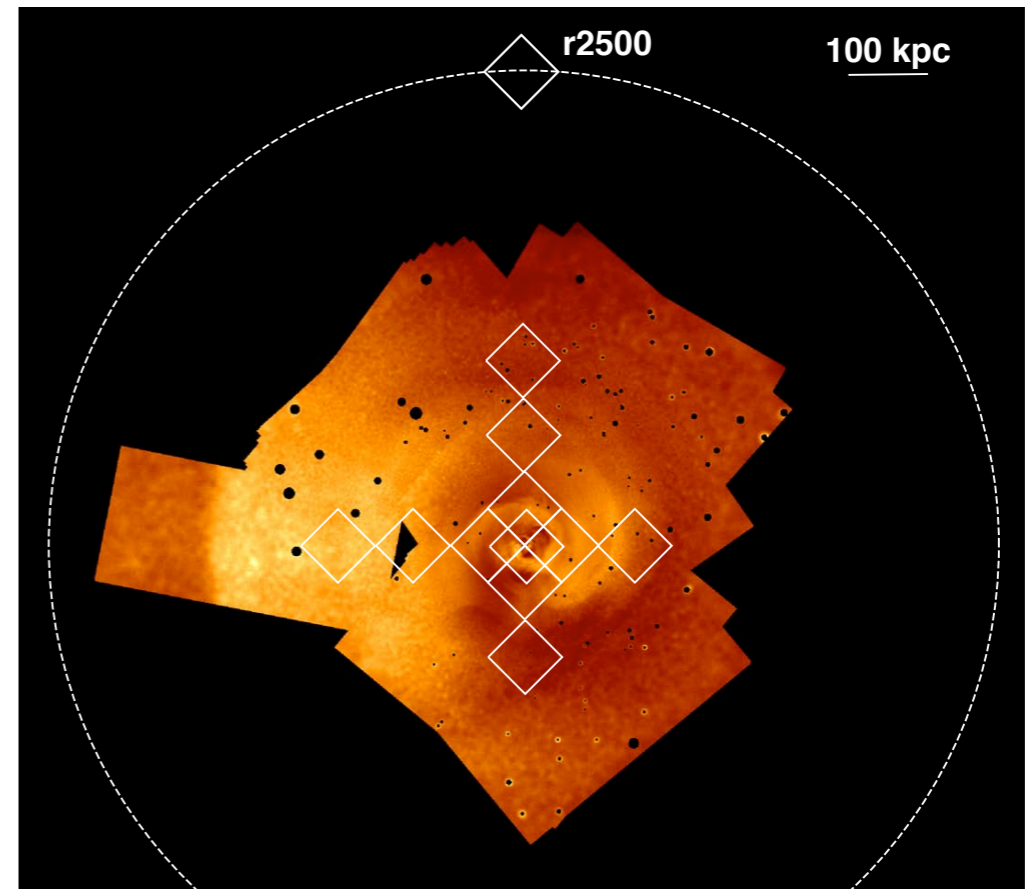
- 前述の、ペルセウス銀河団の超高分解能分光観測の結果は、我々の提案が実現した性能とそれによる科学的成果を示している。
  - ひとみのコンセプトと観測技術が、世界をリードするポテンシャルを持つことを実証し、宇宙物理学に大きな貢献が可能であることがわかった
- ひとみの性能があれば、以下のことが可能になる
  - 銀河団の合体により、銀河団ガスにどのような運動が生じ、どのように平衡に至るのかを、ガスの運動を直接測定することで明らかにする (宇宙の構造形成)
  - 宇宙に構造形成において、銀河や活動銀河核からのアウトフローがどのような役割を担っているのかを、ガスの運動測定から明らかにする (銀河・活動銀河核からのフィードバック)
  - 生命を含む多様な宇宙の素になった重元素が、星でどのように作られ、どのように星間空間、銀河間空間にばらまかれていったのかを、精密X線分光測定により明らかにする (星から銀河団までの物質循環の歴史の解明)

# 宇宙の構造形成

- 銀河団における熱的エネルギーと非熱的エネルギーの全体像を明らかにし、ダイナミックな銀河団の成長の現場を直接測定する。



ガスが静止しているとき  
鉄イオンの熱運動(80 km/s)  
熱運動(80 km/s) + ガスの乱雑な運動(164 km/s)  
(速度は視線方向の成分。  
等方的な速度分布だとそれぞれ1.73倍)



- ➔ 近傍 ( $z < 0.05$ ) の銀河団の高温ガスを100 kpcの精度で中心部と周辺部に空間分解し観測する。
- ➔ 銀河団ガスのバルクな運動と乱流運動によるエネルギーを熱的エネルギーと比較するために、ガスの平均速度や速度分散を、100–200 km/sの精度で、中心コアとそれ以外の領域に分けて空間分解し測定する。



# 銀河・活動銀河核からのフィードバック

- 活動銀河核による物質とエネルギーフィードバック（散逸）の全体像を明らかにし、構造形成に対する活動銀河核の寄与を明らかにする。

ASTRO-H white paper #8: AGN winds (Kaastra et al. 2014)

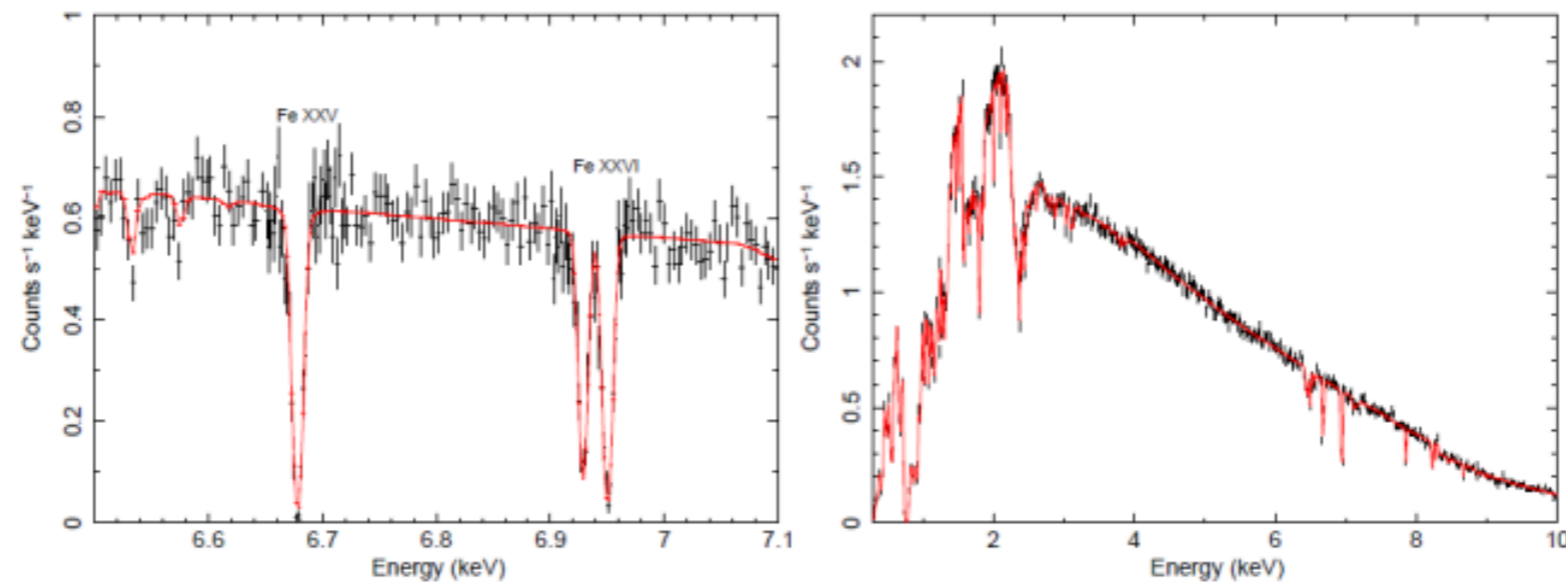


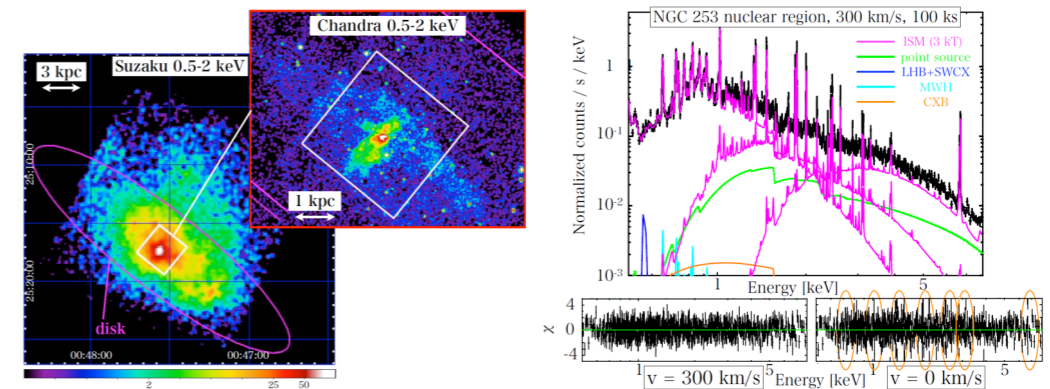
Figure 3: Simulated spectrum for NGC 4151 for 100 ks exposure time.

- 活動銀河核の降着円盤風を観測，その速度と密度を決定する。
- その際，視線方向の速度は100km/s 程度，速度分散を200 km/s よりもよい精度で決定する。また活動銀河核からの異なる起源のX線放射成分を精度よく弁別する。

# 星から銀河団までの物質循環の歴史の解明

- 恒星や超新星爆発による元素合成から、星間空間から銀河間空間に至るさまざまな階層の元素循環をトレースし、宇宙の大規模構造での元素組成の進化を直接観測する。

ASTRO-H white paper #11: High resolution spectroscopy and circumgalactic gas in the milky way and other galaxies (Paerels et al. 2014)



**Figure 5:** Left: *Suzaku* and *Chandra* images of NGC 253 in 0.5-2.0 keV. White square and magenta ellipse indicate the proposed region and the optical disk. Right top: an expected SXS spectrum of the proposed region with an exposure time of 100 ks fitted with three-temperature ISM (magenta), point sources (green), and X-ray background (blue, cyan and orange) models. Blue is the contribution from the Local Hot Bubble (LHB) and Solar Wind Charge Exchange (SWCX) emission; cyan is the emission from the Galactic (Milky Way) Halo (MWH), and orange is the contribution from the unresolved Cosmic X-ray Background (CXB). Right bottom: residuals between the models and the data with outflow velocities of 300 km s<sup>-1</sup> and 0 km s<sup>-1</sup>. Medium energy resolution of 7 eV is assumed. The orange ellipses emphasize post-fit residuals at the strongest emission lines if a spectrum simulated with a velocity shift of 300 km sec<sup>-1</sup> is fit with a model with a zero velocity shift.

- ➔ OからFe, Niにいたる銀河中の多様なプラズマに含まれる主要な重元素の組成と拡散速度を、星間ガスの熱速度と同程度かよりよい精度で決定する。
- ➔ 視線方向の速度は 100km/s 程度の精度で。
- ➔ 活動銀河核トーラスからの輝線コアを分離するために 200 km/s 程度の精度で速度分散を測定する。

# 今後の方向性

---

- 高エネルギー宇宙物理学分野における世界の情勢
  - 2005-2015 すざく (超高精度分光・撮像 + 広帯域)
  - 2012- NuSTAR (硬X線撮像分光)
  - 2028- Athena (大面積, より多素子の超高精度分光)
- ひとみ, 特にX線マイクロカロリメータによるこれまでにない超高精度分光撮像を実現してそのサイエンスを早急に (2020年代前半に) 復旧することが, 科学的に重要.
- 硬X線観測は, 2020年代半ばから2030年代にかけて, NuSTARを凌駕するミッションとして再検討する. ロードマップ上でも位置付けしなおす.