



軟X線から硬X線の広帯域を高感度で
撮像分光する小型衛星計画 **FORCE**
- *Focusing On Relativistic universe
and Cosmic Evolution* -

2017-01-06

中澤 知洋(東京大学), 森浩二 (宮崎大)

FORCE WG メンバー

- 村上弘志 (東北学院)
- 寺田幸功 (埼玉)
- 久保田あや (芝浦工業)
- 内山泰伸、齊藤新也 (立教)
- 中澤知洋、馬場彩 (東京)
- 谷津陽一 (東京工業)
- 幸村孝由 (東京理科)
- 北山哲 (東邦)
- 高橋忠幸、石田学、渡辺伸、中島真也、萩野浩一、坂井真一郎、石村康生、福田盛介、岩田直子 (ISAS/JAXA)
- 松本浩典、長野方星 (名古屋)
- 古澤彰浩 (藤田保健衛生)
- 鶴剛、上田佳宏、田中孝明、内田裕之 (京都)
- 常深博、中嶋大 (大阪)
- 太田直美 (奈良女子)
- 信川正順 (奈良教育)
- 深沢泰司、高橋弘充、大野雅功 (広島)
- 栗木久光、寺島雄一 (愛媛)
- 森浩二、武田彩希 (宮崎)
- 岡島崇、森英之、山口弘悦 (GSFC)
- 小高裕和 (Stanford)

主となる科学目的

© ESO/M. Kornmesser

強い星間吸収で埋もれた
銀河中心巨大BHの数・成長
($>10^4 M_{\odot}$)

© NASA

中間質量BHの誕生・成長
($10^2-4 M_{\odot}$)

© STScI

Big Bang
Afterglow
light pattern

Recombination

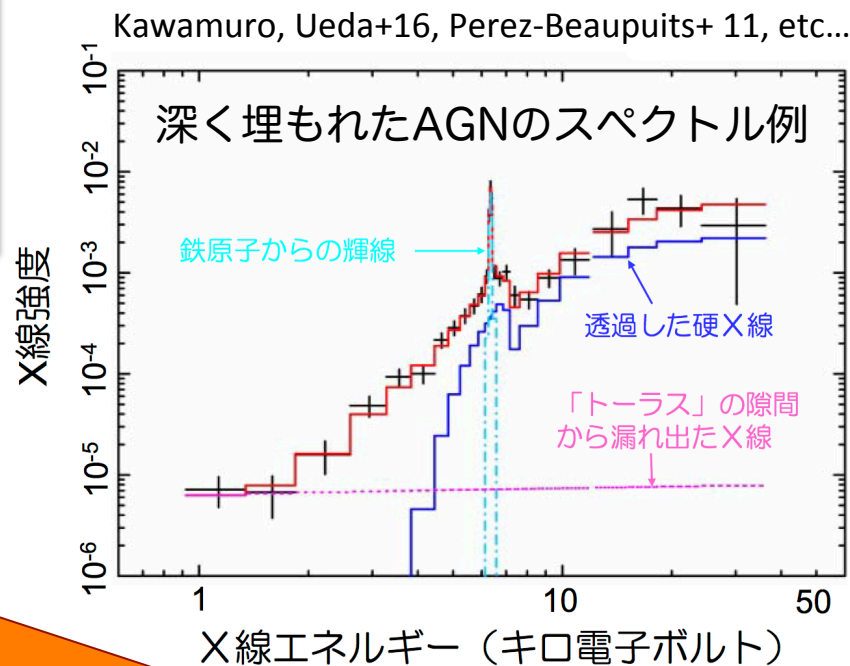
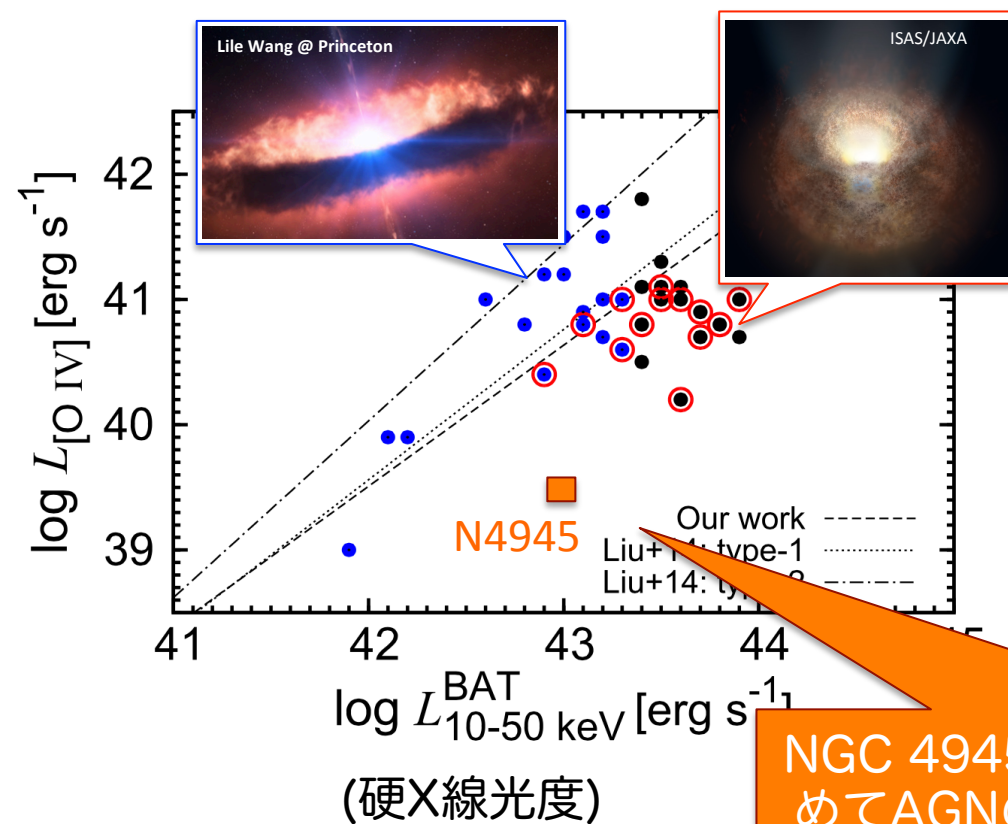
© Ute Kraus

多数存在するはずの
「系内孤立BH」
($<10^2 M_{\odot}$)

- 宇宙のあらゆる階層において未だ観測によってその存在数が決められていない = 「ミッシング」なブラックホールを探索し、それをプローブとして現在の宇宙を構成する天体の形成史を紐解くこと

1-80 keV帯域の必要性

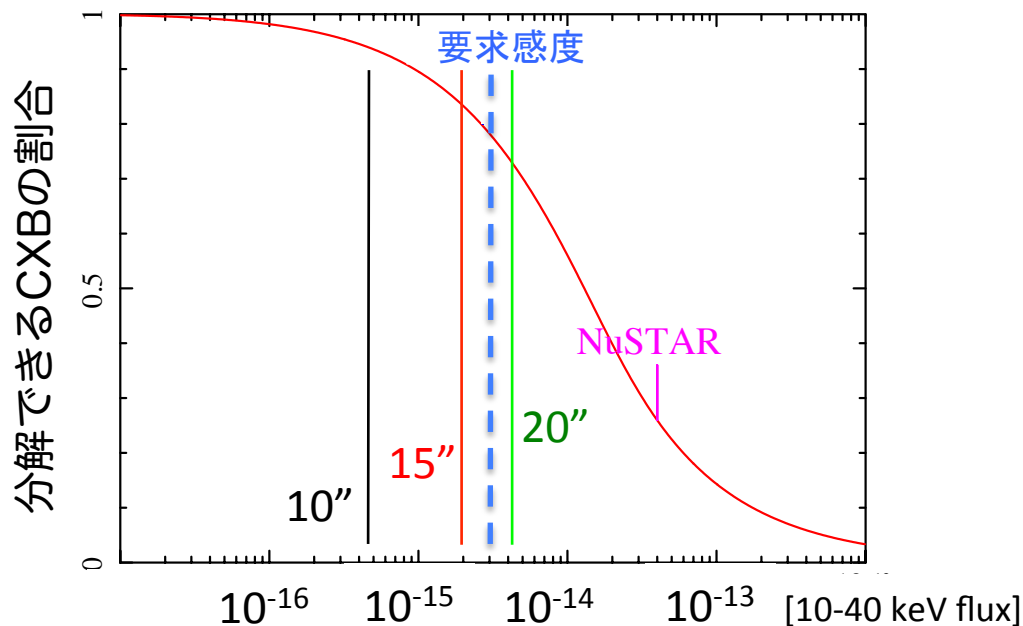
- 硬X線なら、AGNの真の L_x が分かる。星生成の影響も受けない。
- 宇宙には大量のダストに**深く埋もれたAGN**(大立体角のトーラスで隠された)が多く存在し、これは**硬X線で最もよく見える**
→ 赤外サーベイと相補的



NGC 4945 (硬X線で最も明るい)は、X線で初めてAGNの存在が判明。中間赤外輝線は微弱

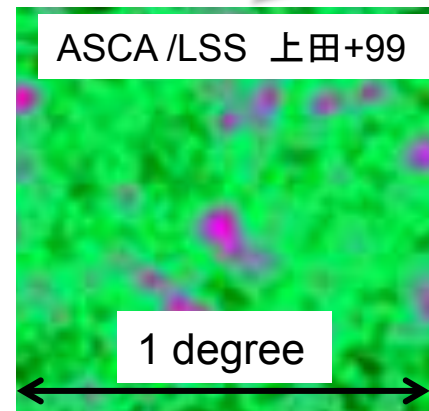
< 15'' の分解能のもつ意義

$F_x > 2e-15$ cgs まで検出。CXBを80%分解
 → CXBのピークである 30 keV 帯域で、その主たる起源を同定(現状は推定)。



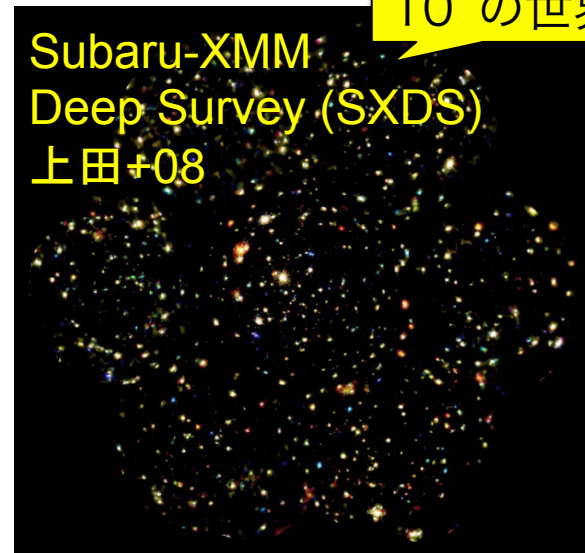
他にも、銀河面X線放射の点源を分離し、真に広がった放射を同定するなどにも有効。

3'の世界



10''の世界

Subaru-XMM
 Deep Survey (SXDS)
 上田+08



科学目標と成功基準＋ミッション要求

- 科学目的から導かれる科学目標とその成功基準

上位となる科学目的	科学目標 フルサクセス	エクストラサクセス
巨大ブラックホールと銀河の共進化の解明	1) 埋もれた AGN の光度関数を決定し、AGN のダウンサイジング進化の有無を明らかにすること	
中間質量ブラックホールの探査		2) 超高光度X線天体 (ULX) の正体を明らかにすること
銀河系内ミッシングブラックホールの探査		3) 硬X線において、銀河中心付近に存在する $L_X = 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ の点源を捉えること

- ミッション要求：硬X線で高感度 ($3 \times 10^{-15} \text{ erg/s/cm}^2$ @10-40 keV) で、ミッションライフ内 (~1yr) に、必要な統計を稼ぐこと

空間分解能 (HPD)	<15''
エネルギー範囲 (keV)	1-80
有効面積 (cm^2 @30 keV)	>350
視野 (50% resp. @30 keV)	>7'×7'
エネルギー分解能 (FWHM)	<300 eV at 6 keV comparable with HXI

衛星の概要

- 焦点距離 10 m
- 3台の同一のスーパーミラーと検出器ペア

Wideband Hybrid X-ray Imager (WHXI)

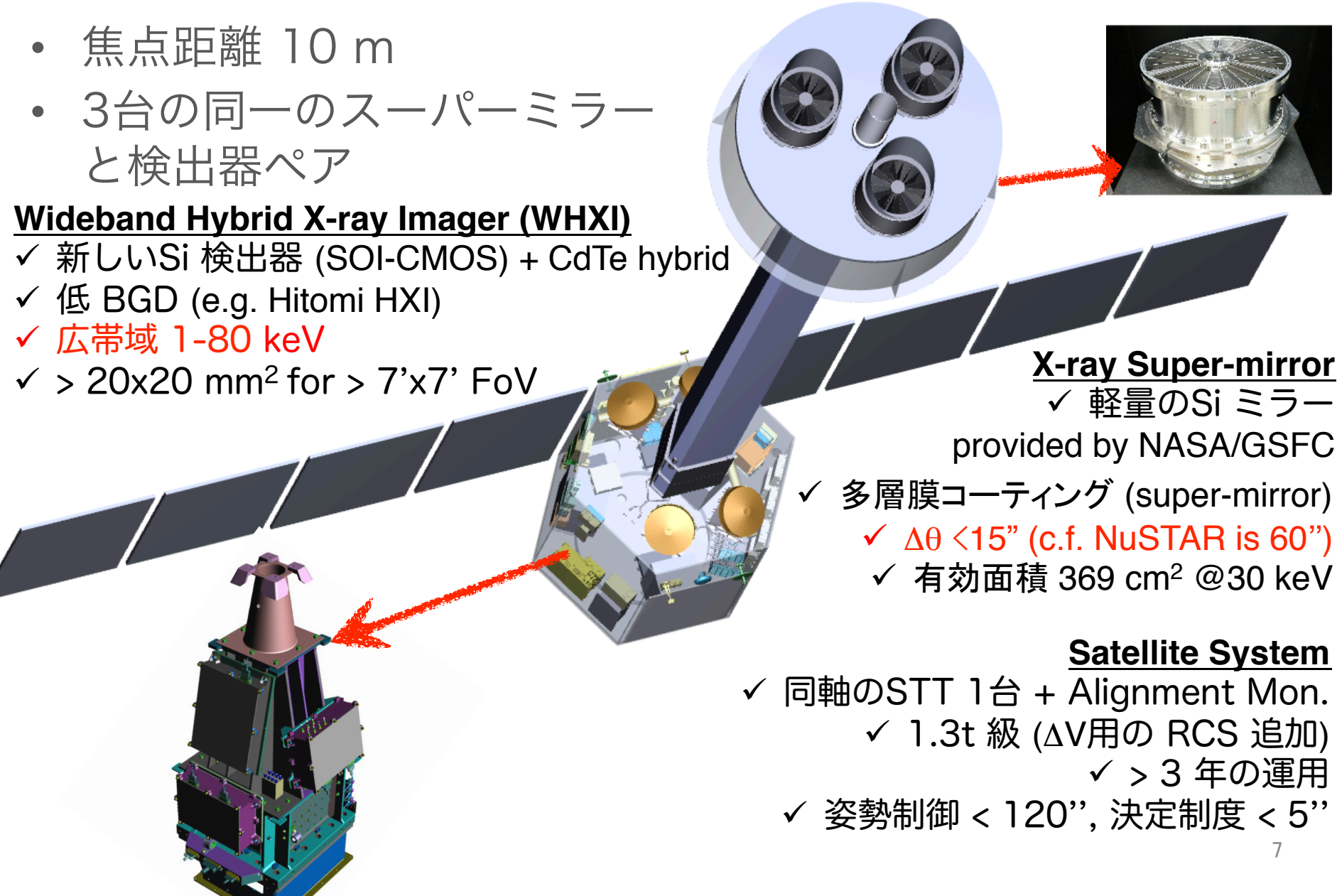
- ✓ 新しいSi 検出器 (SOI-CMOS) + CdTe hybrid
- ✓ 低 BGD (e.g. Hitomi HXI)
- ✓ 広帯域 1-80 keV
- ✓ $> 20 \times 20 \text{ mm}^2$ for $> 7' \times 7'$ FoV

X-ray Super-mirror

- ✓ 軽量のSi ミラー provided by NASA/GSFC
- ✓ 多層膜コーティング (super-mirror)
 - ✓ $\Delta\theta < 15''$ (c.f. NuSTAR is $60''$)
 - ✓ 有効面積 369 cm^2 @30 keV

Satellite System

- ✓ 同軸のSTT 1台 + Alignment Mon.
 - ✓ 1.3t 級 (ΔV 用の RCS 追加)
 - ✓ > 3 年の運用
- ✓ 姿勢制御 $< 120''$, 決定制度 $< 5''$



高宇連における 「ひとみ」喪失後の FORCE の位置付け

ロードマップ：将来のシナリオ

2016/9/29 高宇連資料より

理念：日本は**ワイドバンド観測による高エネルギー天体の物理**の抽出を、その柱の一つとしてきた。**日本の硬X線・軟ガンマ線の多層膜、検出器技術は、世界トップレベル**である。硬X線や軟ガンマ線のサイエンスがそこにあり、対応した将来ミッションも検討されている。**この技術を、発展させ、強化して行くことは、日本の宇宙科学の進展に資すると信じる。**

- NuSTAR+XMM/Chandraによるサイエンスを継続。精密分光と硬X線を組み合わせるサイエンスは、**後継機時代にNuSTARが活動していれば、これと連携が要**。活動していない場合には、ATHENA+FORCE 時代を見据えたサイエンス検討を行う。
- 2017-2020+は、X線代替機のリソースを増強しつつ、硬X線・軟ガンマ線の基礎技術の強化、およびサイエンスの検討を進める。
- その次は、**2020年代中頃**を目指し、運用後半におけるATHENAとの同時観測を視野に入れた「FORCE」(次期硬X線・広帯域ミッション)を進め、次に、**2020年代後半- 2030年代初頭**をめどに「eCAST」(MeVの開拓ミッション)の実現をめざす。後者は、ISS、長期気球など多様な実現方法により小規模の前倒し実証観測も検討する。

- **代替機の実現が最優先**。その上で、代替機でカバーできない「ひとみ」サイエンスの recovery & beyond を目指す
- **~2025年の打ち上げを想定し、2-4年かけて技術・サイエンスを強化**
- 第2 3期学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン「学術大型研究計画」に内定

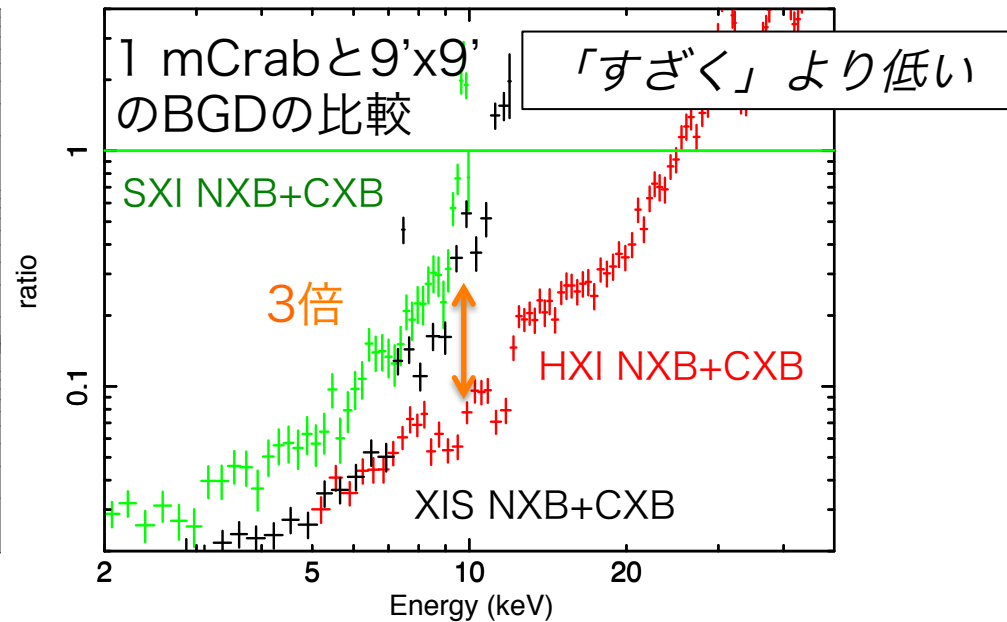
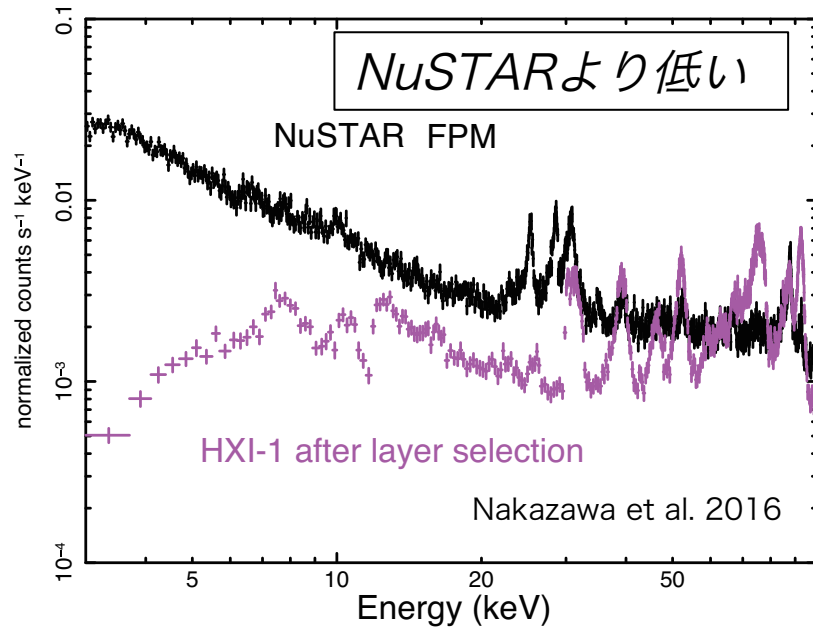
FORCE-WG として今後成すべきこと

- スケジュールとシステム検討
 - X線代替機の検討（スケジュール、マンパワー）を優先した上で、FORCE開発のマンパワーも確保。スケジュールを再編。
 - ひとみの姿勢・構造の成果を反映。衛星の軽量化。衛星側RCSによる軌道投入も検討。
- サイエンス目的の明確化・先鋭化
 - ミッシングブラックホールサイエンスの更なる検討
 - 広がった放射など、サイエンステーマの広がり創出
 - マルチメッセンジャー天文学の時代の他波長・理論家との連携
- 観測装置開発TRL の向上
 - 鏡：シリコンミラー試作、多層膜(歪み、散乱光の精密評価)
 - 検出器：SOI-CMOS の性能向上、カメラ化

サイエンステーマの広がりの例 広がった放射のサイエンス

「ひとみ」HXIは“最高”の低BGDを実現。

改善点もありさらに30-50%削減可能 @ 10 keV付近。

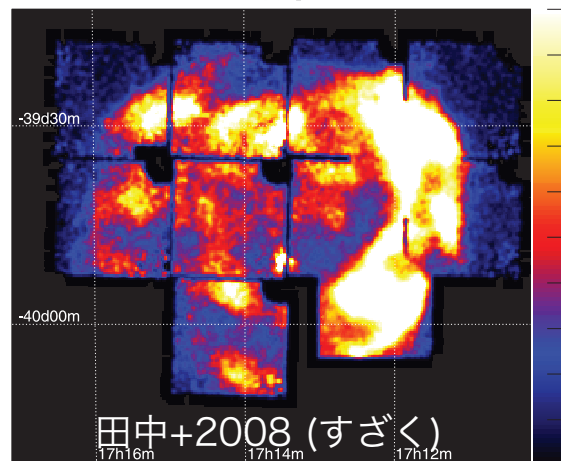


- ❖ FORCEのWHXIは、10 keV付近で最高の Diffuse S/N比を持つ。
- ❖ $\Delta\theta < 15''$ でも一つの不定性=CXB 揺らぎも克服。

サイエンステーマの広がりの例 広がった放射のサイエンス

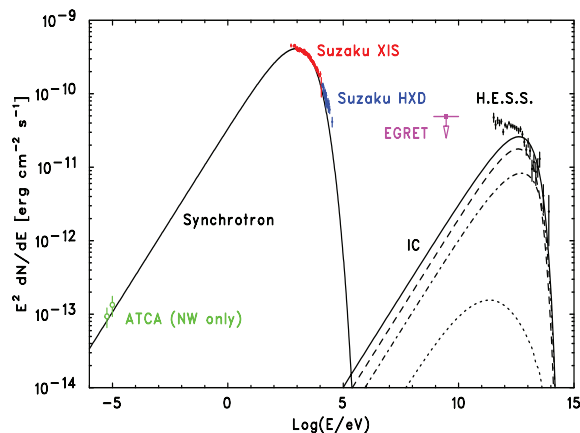
FORCEは (> ~8 keVで) 世界最高のDiffuse感度を実現

例：超新星残骸における粒子加速の解明

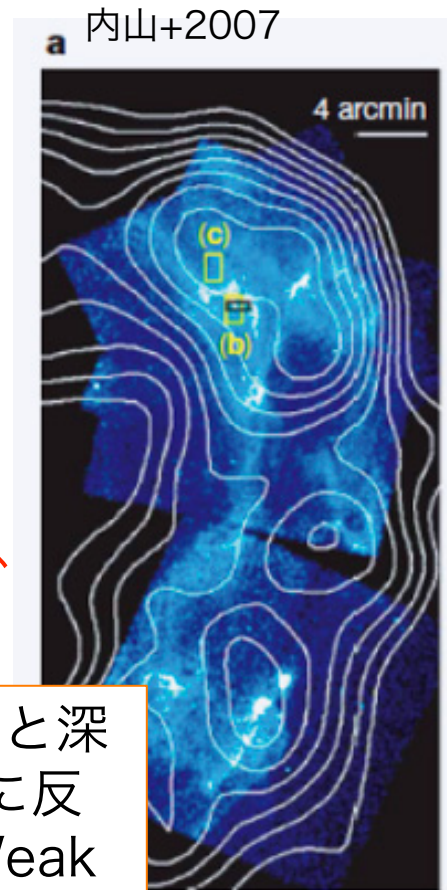


シンクロトロン放射の折れ曲がり

1. 最高Eが何で決まっているか決定 (冷却? 年齢? 逃亡?) → 電子が限界まで加速し、冷却とバランス(すざく)
2. 高角分解能で、磁場乱流度の測定、磁場増幅など、加速現場の全貌を



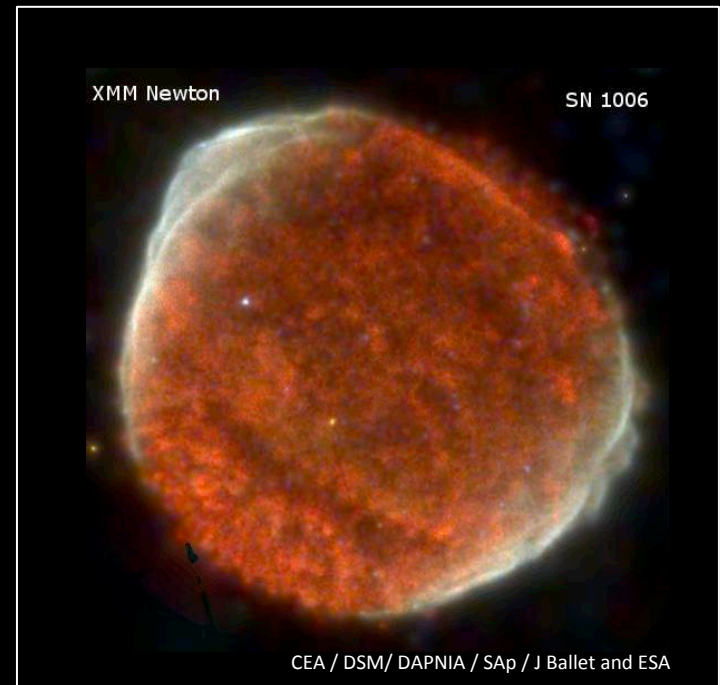
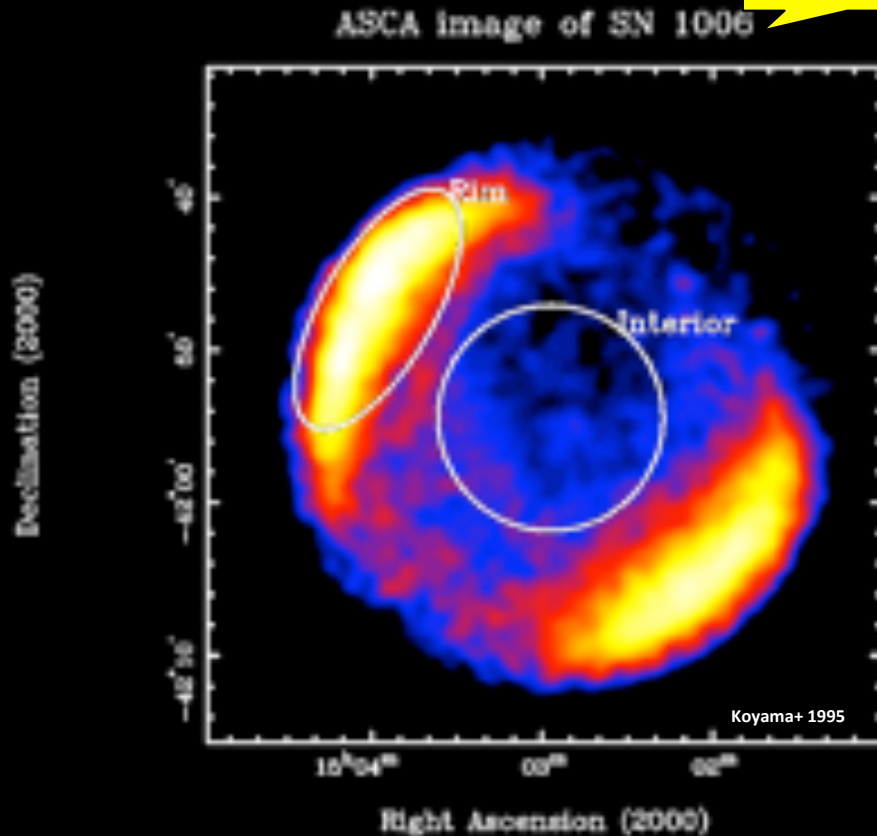
Diffuse観測のサイエンスを、もっと深く検討し、必要とあれば設計要求に反映させ、電波(SKA等)、可視光(Weak Lens等)、TeV(CTA等)との連携を。



HPD 15" で見る広がった天体の例

3'の世界

10"の世界



このイメージを 10-80 keV の硬X線帯域でも

まとめ

- 宇宙のあらゆる階層において未だ観測によってその存在数が決まっていない「ミッシングブラックホール」を探索し、宇宙形成史を解明する次世代広帯域撮像分光X線衛星 *FORCE* を提案する
- 10秒角の硬X線鏡と軟X線から硬X線(1- 80 keV)までカバーする単一の検出器3台を有する 1.3 t 級の小型科学衛星
- 課題を一つ一つ具体的に認識・優先順位付けし、工学系の先生や国際的な協力を経て検討を進めている
- 「ひとみ」の喪失と実績を反映し、サイエンス検討(Observatory Science や Key science) を進める。例えば広がった放射の感度や、他波長との連携で進むサイエンス。
- 2020年代中頃の実現を目指し、スケジュールを再編し、開発を推進する。