#### 広帯域X線高感度撮像分光衛星

FORCE の現状と

#### 今後の展望

Focusing On the Relativistic universe and Cosmic Evolution



中澤知洋(名古屋大)、森浩二 (宮崎大学)

T.G. Tsuru (Kyoto), Y. Ueda (Kyoto), T. Tanaka (Kyoto), M. Ishida (ISAS/JAXA), H. Matsumoto (Osaka), H. Awaki (Ehime), H. Murakami (Tohoku Gakuin), M. Nobukawa (Nara edu), A, Takeda (Miyazaki), Y. Fukazawa (Hiroshima), H. Tsunemi (Osaka), T. Takahashi (Kavli IPMU/Tokyo), A.E. Hornschemeier, T. Okajima, W.W. Zhang, B.J.Williams (NASA/GSFC) and the FORCE WG

## 高エネルギー物理学の課題

・高宇連 第二期将来検討委員会 報告より究極の目的:

「我々を取り巻く世界を理解し、我々の来し方行く末を知る」

X線~ GeV ガンマ線帯域観測で みる課題を3つに分類

#### 宇宙の物質・空間の あり方と起源

Dark matter の空間分布と相互作用への制限 Missing baryon 候補であるWHIM探査

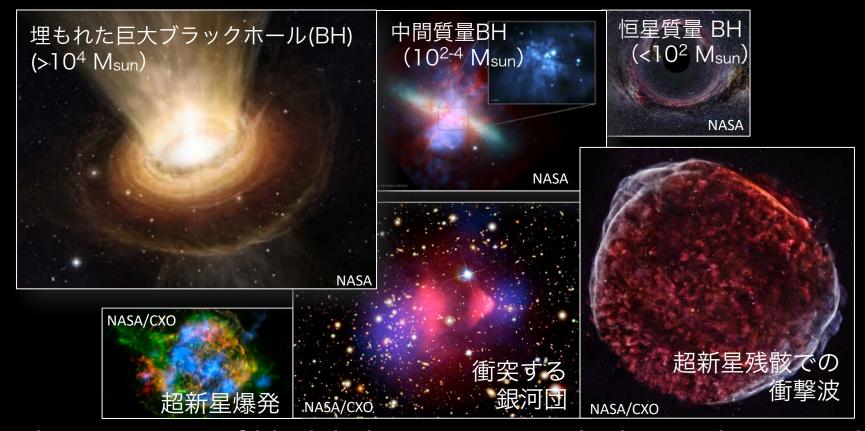
#### 宇宙における多様性の発現

宇宙再電離・銀河と巨大BH形成 宇宙の化学進化 宇宙における粒子加速

#### 物理学の根本原理の追求

BH近傍観測による極限重力場 中性子星状態方程式の制限

## 科学目標

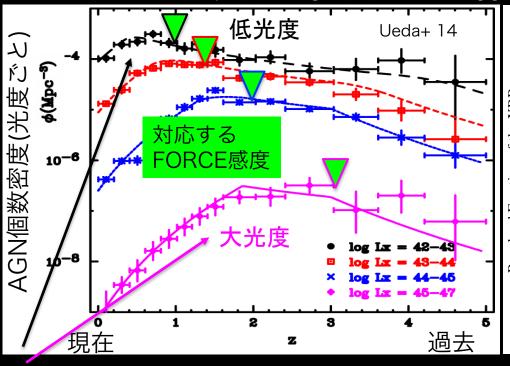


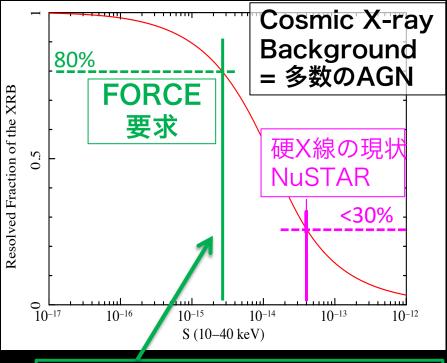
- complete a census of black holes across cosmic time and mass scale,
- measure the energetic content of relativistic particles in the universe,
- understand the explosion mechanism and nucleosynthesis in SN

#### 硬X線を含む広帯域X線の世界最高の観測でこれを実現

### サイエンス(1): BH探査

成長する巨大BH = 活動銀河中心核(AGN)





- 大光度のAGN (大きなBH) が先に誕生?ヺウンサウジング
- BH成長期に厚いガスが、大立体角を覆う=「IR・可視では見え難い」AGN活動
- → 硬X線は影響なく探査可能(相補的)

宇宙の天体進化理解の重要なピース

- <u>・覆うガ</u>スに関わらず
- ・低光度のAGNまで

**数密度のピーク**を捉える感度

- $\rightarrow$  3x10<sup>-15</sup> erg/s/cm<sup>2</sup>@10-40 keV
- → CXB の80%を分解する能力

#### サイエンス(2):粒子加速と超新星爆発

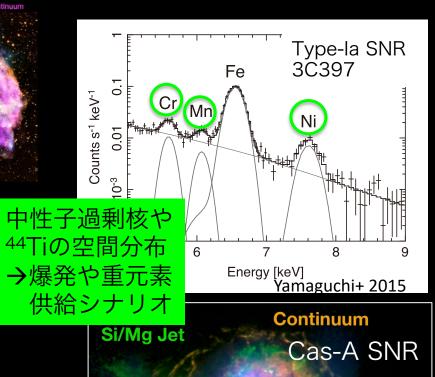
W49B SNR

超新星残骸(SNR): 粒子加速の始まりと極み

- SNR粒子加速の「両端」を押さえる
- 準相対論的粒子の硬X線(始まり)
- PeV電子のシンクロトロン硬X線(極み)
- 宇宙最大の加速器、銀河団も

粒子加速理解の重要なピース

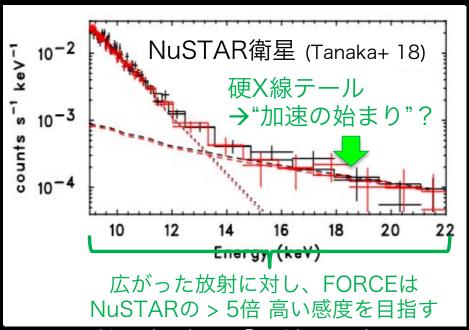
超新星爆発: NiやTiの分布





#### サイエンス(2):粒子加速と超新星爆発

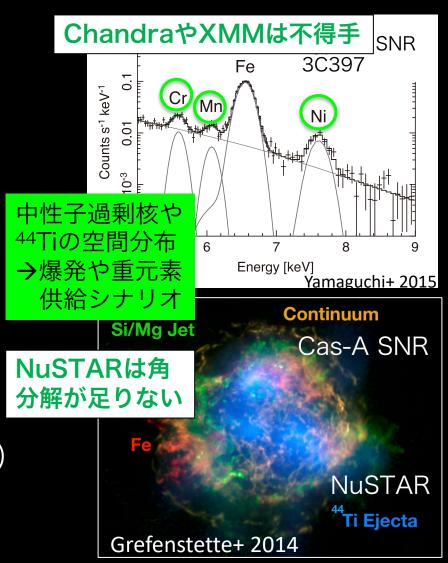
超新星残骸(SNR): 粒子加速の始まりと極み



- SNR粒子加速の「両端」を押さえる
  - 準相対論的粒子の硬X線(始まり)
  - PeV電子のシンクロトロン硬X線(極み)
- 宇宙最大の加速器、銀河団も

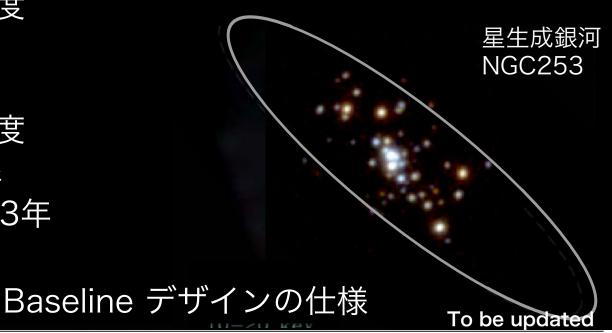
粒子加速理解の重要なピース

超新星爆発: NiやTiの分布



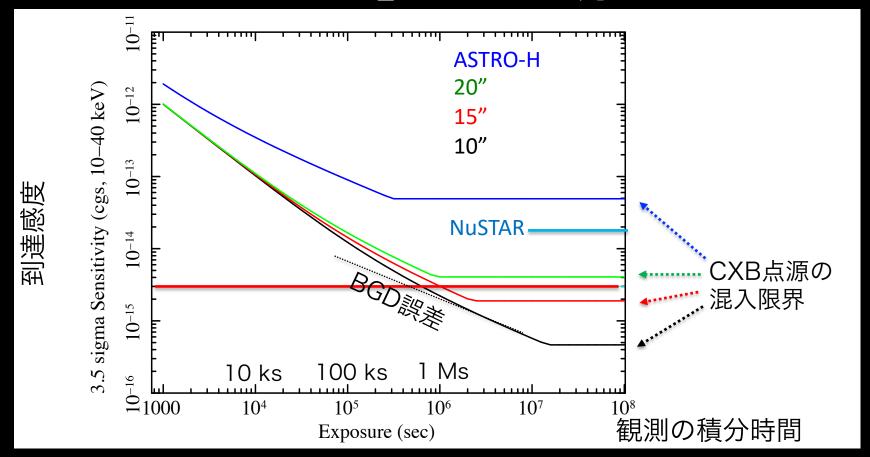
#### ミッション要求

- 硬X線帯域で高感度
  - 2-3x10<sup>-15</sup> erg/s@ 10-40 keV
- 広帯域X線への感度
  - z = 0~3 の鉄輝線
- ミッション期間 > 3年



		U-ZU KAV	i o be upuateu
Parameter	FORCE	NuSTAR	ASTRO-H
			(HXT & HXI)
angular resolution (HPD)	<15"	58"	1.7'
bandpass (keV)	1-80	3-79	5-80
effective area (cm <sup>2</sup> @30 keV)	>350	comarable with HXI	338
fov $(50\% \text{ resp. } @30 \text{ keV})$	$>7'\times7'$	$\sim 10' \times 10'$	$\sim 6' \times 6'$
timing resolution	several $\times$ 10 $\mu$ s	$2 \mu s$	several $\times$ 10 $\mu$ s
energy resolution	<300  eV at 6 keV	400  eV at $10  keV$	900  eV at $14  keV$
(FWHM)	comparable with HXI	900  eV at $68  keV$	$1500~\mathrm{eV}$ at $60~\mathrm{keV}$

### 「<15"」の必要性



- 目標到達感度 3x10<sup>-15</sup> erg/cm<sup>2</sup>/s CXBの混入限界から <15" が必要
- 1-2 Msでこの感度に到達(3年運用でサーベイ) スーパーミラーの面積と、検出器の低BGDも重要

#### FORCE衛星の概要

JFY2019 戦略予算 システム検討

• 焦点距離 12 m

2 (or 3)台の同一のスーパー ミラーと検出器ペア

X-ray Super-mirror

軽量 Si mirror + 支持ベンチ

15" HPD分解能

スーパーミラー多層膜→硬X線も

by NASA/GSFC

LEO ~900 kg





Ref. Hitomi/HXT

Expendable Optical Boom

✓ 日米で検討

Wideband Hybrid X-ray lm. (WHXI)

✓ Si (SOI-CMOS) + CdTe DSD

✓ 低BGD (Hitomi HXI heritage)

✓ 1-80 keVの広帯域撮像分光

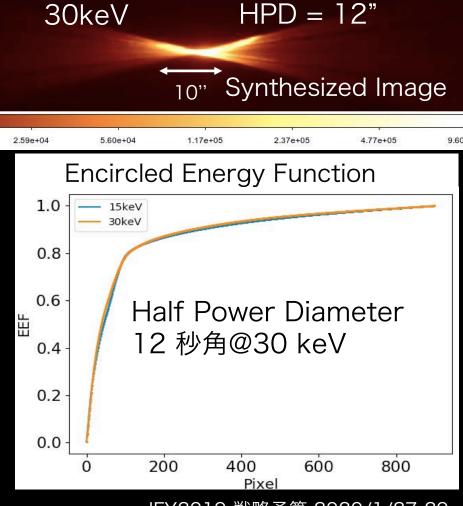
京大、名大、宮崎大、阪大、 ISAS、 理科大、広大ほか

Ref: Hitomi/HXI

#### Siミラー開発の進捗



- NASA 製作の2回反射1ペアの 角分解能を SPring-8 で測定
- •素材+多層膜として、<15" HPD
- → 高精度の組み立て、大量生産 など、残る課題に取組んでいる

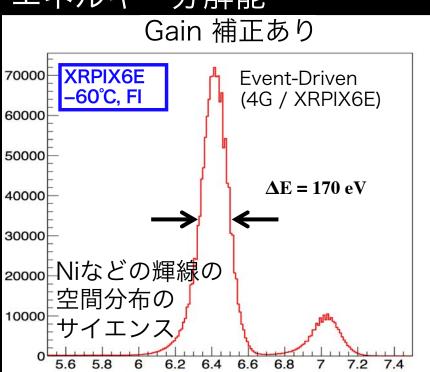


JFY2019 戦略予算 2020/1/27-29 次期試作の測定予定

#### SOI-CMOS イメージャ開発

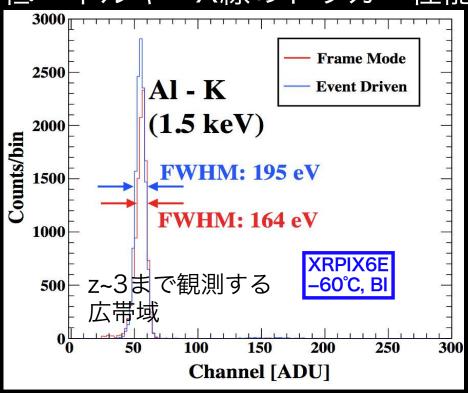
JFY2019 戦略予算 読み出し系開発など

エネルギー分解能



Energy [keV]

低エネルギーX線のトリガー性能



- •回路改良により、分光性能とSelf Trigger 機能は要求を満たす
- I/Fの簡素化を試作中

詳細は「ポスター 2.28 小型衛星計画 FORCE 搭載用X線SOIピクセルセンサーの開発」参照

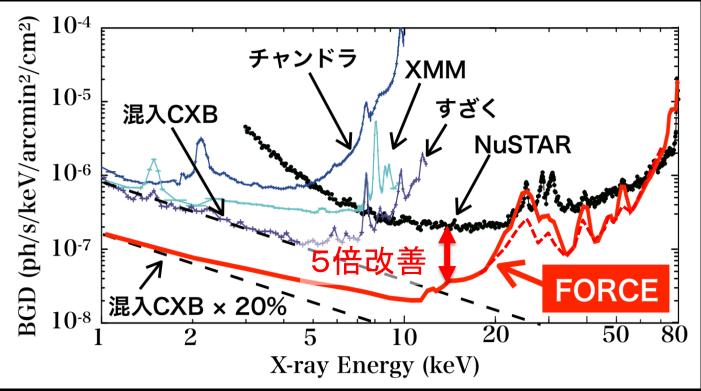
2020/01/09

#### 低バックグラウンド(BGD)技術

Hitomi/HXI 技術

単位有効面積・立体角あたりのBGD





大きく広がった放射に対してはBGDの低さが感度を決める

→ SNR硬X線テールや銀河団など、diffuse science を推進

#### FORCEがもたらす豊富なサイエンス

- 世界最高感度の硬X線プローブ(2030年代唯一) -
- ・ 高い空間分解能での硬X線・広帯域分光
  - 高感度点源サーベイ: AGN (系外) & 孤立BH (系内)
  - 近傍銀河の硬X線点源分解: ULX, SN la, kilonova
  - 濃い物質に囲まれた or 高温点源: SN type IIn
  - SNRなどの硬X線撮像: かに星雲 etc
- 超低検出器BGD (+CXB も~8割除去)
  - 薄く拡がった硬X線天体: 銀河団外縁、パルサー風星雲の外側
  - 拡がった微弱輝線の検出:SNR

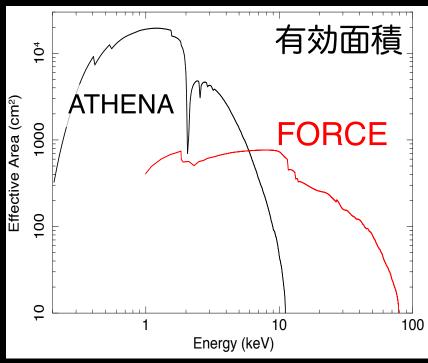


2020/01/09

SSS2020

XRISM, Athena と FORCE





- Hitomi = 「軟X線超精密分光」と「広帯域X線撮像分光」 後者を引き継ぎ、先鋭化したものが FORCE (高宇連ロードマップで「高宇連が中心となって推進する計画」)
- FORCEはAthena の 1 桁高い *E* 帯域を担当。BH探査でも、 近傍 (z<3) "宇宙の活動が最も激しかった時代"は FORCE 相補的 Hi-z (z>3) "宇宙が形作られる時代"は Athena (赤方偏移で軟X線に)

# FORCE サイエンス研究会(1/2)



第1回 FORCE 研究会 「missing blackhole ワークショップ」 2017年11月6,7日@京都大学

第2回 FORCE 研究会「高感度・広帯域X線観測で探るブラックホール降着現象の物理」 2019年3月5,6日@京都大学



→ 第3回 FORCE 研究会「高感度・広帯域X線天文衛星FORCEで探る 高エネルギー宇宙」**2020年2月20,21日**@京都大学

## 国際協力·連携+研究会(2/2)





- 稼働中の唯一の硬X線撮像衛星 NuSTAR チームと、サイエンス/検出器開発で協力を確認
- FORCE Science WS @ GSFC, Nov 19-20, 2019
- US team 始動(PI: A. Hornschemeier)
- US 側で予算を獲得、Si-mirror に加え、多層膜の study と EOB 検討、MoO proposal にむけた活動を開始

#### まとめ

- 「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。天体進化と粒子加速の、ミッシングピースを 捉えることを主目的とする。
- 世界最高感度の硬X線プローブであり、多波長天文学の硬X線を担う、2020年代末から30年代初頭の唯一のミッション。これを生かし、多様なテーマにも挑む。
- 課題を識別・整理しながら、関係各位の協力を仰ぎつつ、システム検討や検出器開発、国内外の連携を進め、WGとして実現にむけて奮闘中。