

ダークバリオン探査衛星: Super DIOS

佐藤浩介 (PI, 埼玉大学)

大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、藤田裕 (東京都立大学)

山崎典子、石田学、前田良知 (ISAS/JAXA)、満田和久 (NAOJ)

三石郁之、田原譲 (名古屋大学)、河合誠之 (東京工業大学)

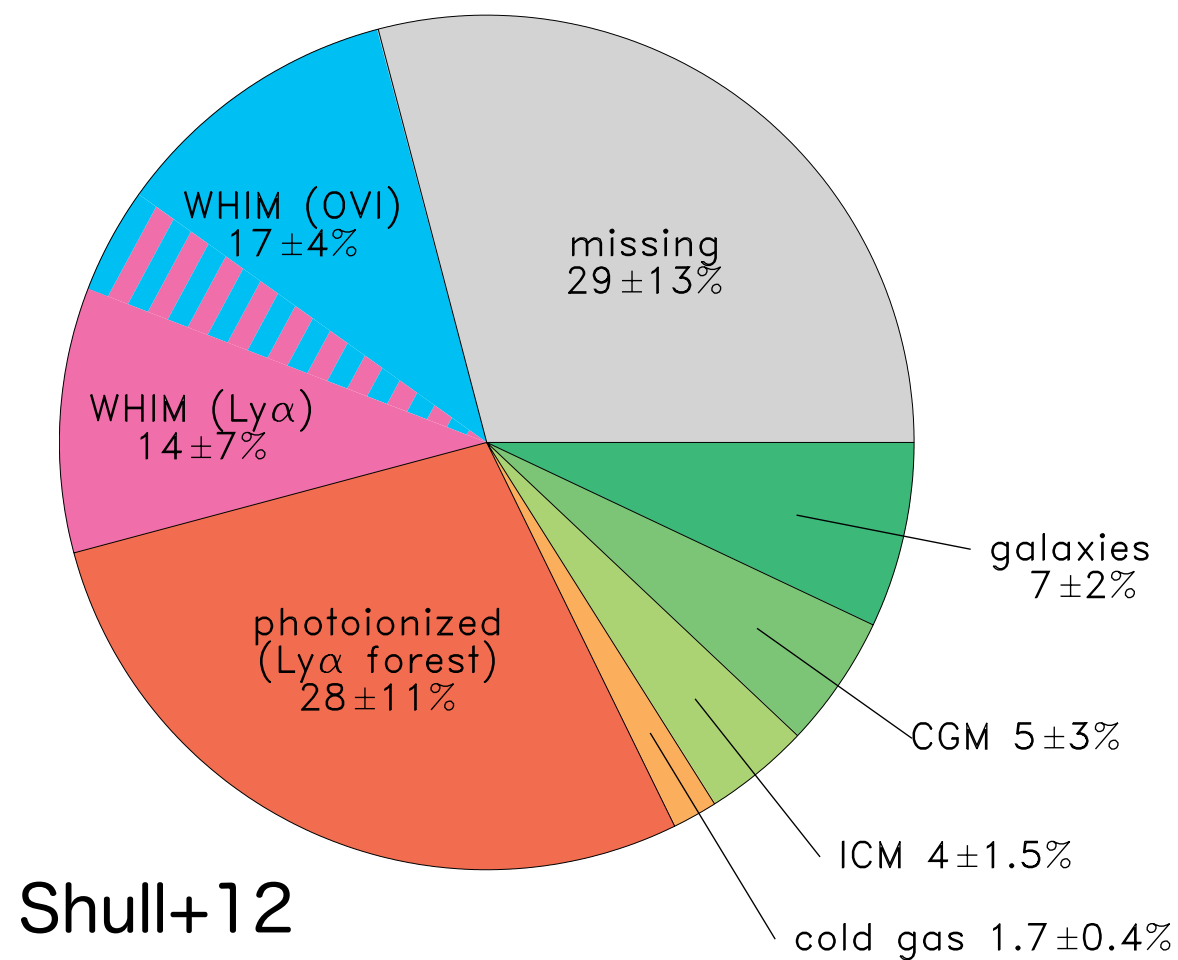
松下恭子 (東京理科大学)、永井大輔 (米 Yale大学)

吉川耕司 (筑波大学)、大里健 (仏 ソルボンヌ大学)

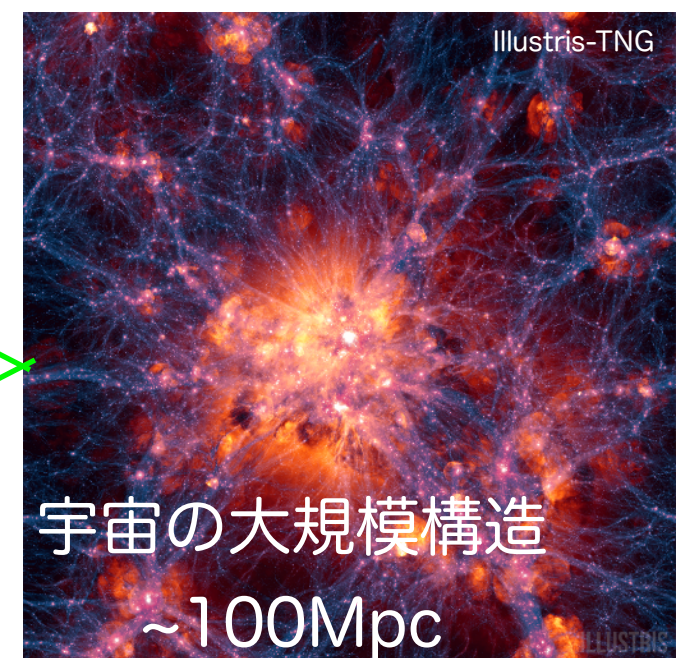
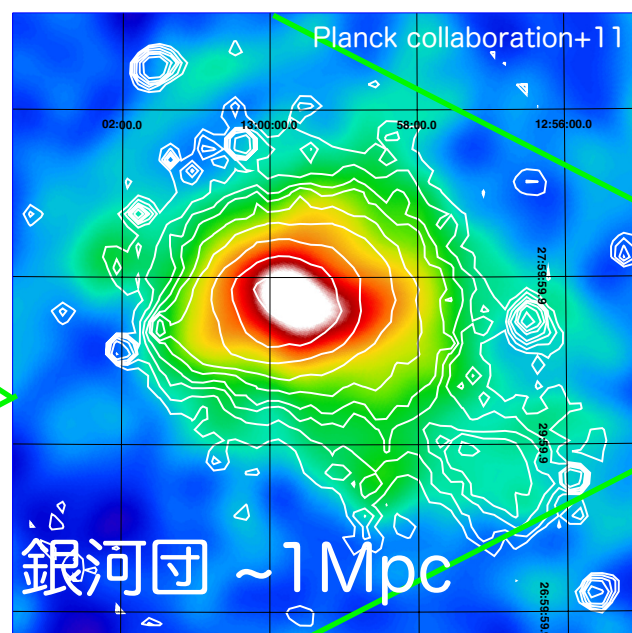
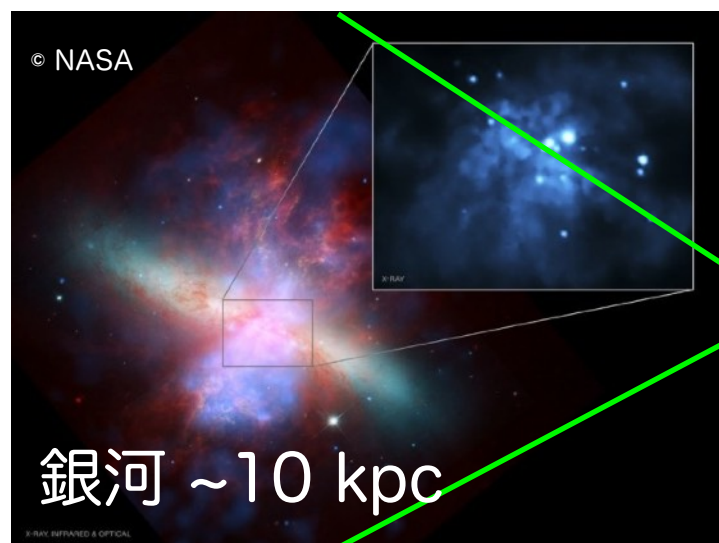
藤本龍一 (金沢大学)、鶴剛 (京都大学)、太田直美 (奈良女子大学)

山田真也、一戸悠人 (立教大学)、内田悠介 (広島大学)、中島裕貴 (AIST)

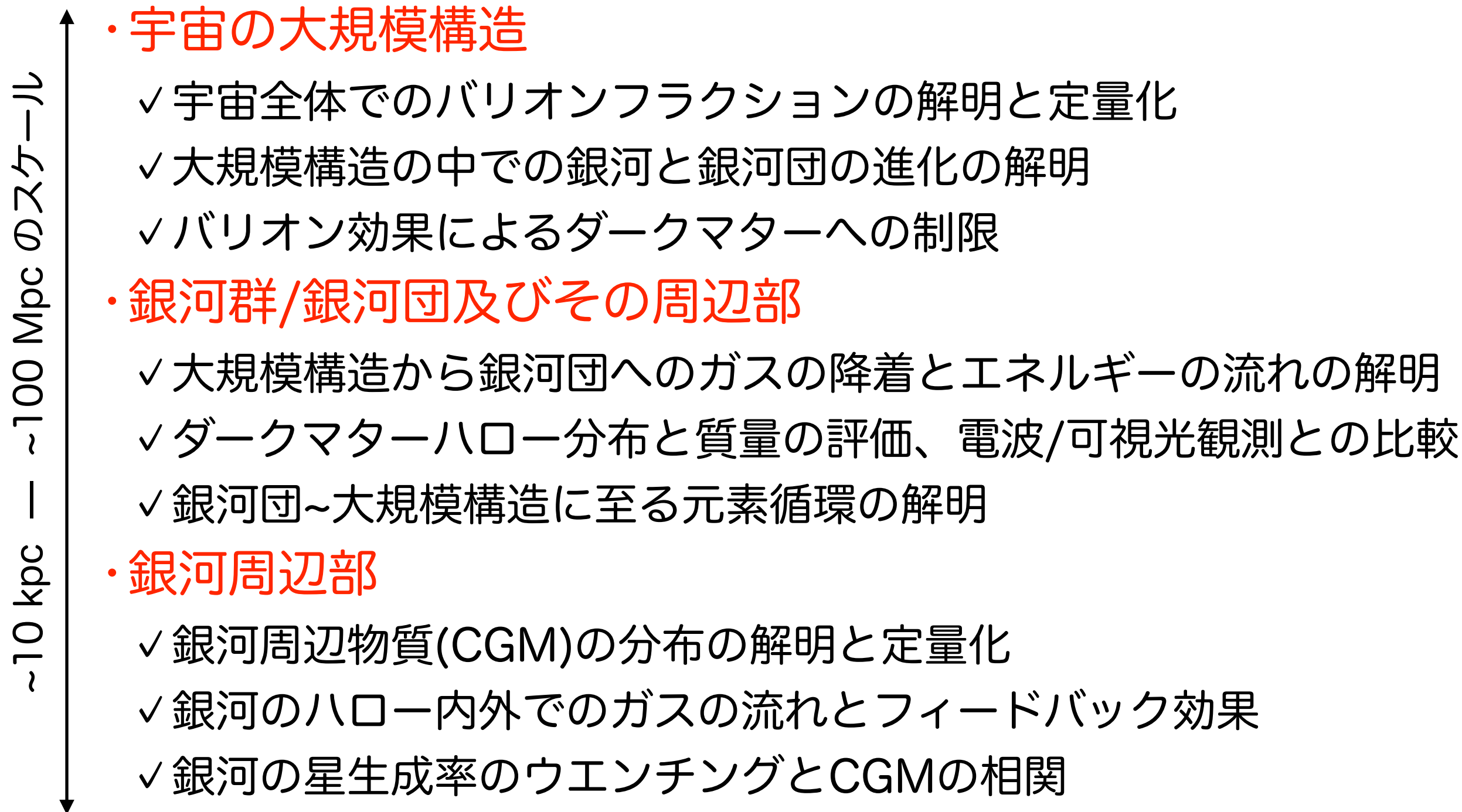
ダークバリオン探査



- “ミッシング”バリオン問題の解決
- 温度数百万度, 密度 10^{-5} cm^{-3} 程度の希薄なガスの観測
- 様々なスケールにおけるバリオンの直接観測と定量化
 - ✓ 銀河周辺物質 (CGM)
 - ✓ 銀河群/銀河団とその周辺部
 - ✓ 宇宙の大規模構造に付随するガス (WHIM)



ダークバリオン探査



各階層での宇宙のバリオン分布を定量的に観測し、宇宙の進化におけるエネルギーと物質の循環、さらにはダークマター分布との相関の解明を目指す

ISAS/JAXAにRG の設置を申請し、2020年2月に承認

[概要]

本提案では、銀河や銀河団の周辺部、さらには宇宙の大規模構造に沿って広がる温度数百万度の“ダーク”バリオンを定量的に測定し、その分布と宇宙論的進化を明らかにすることで、構造形成を支配するダークマターにも新たな制限を与えることを最終目的としている。特に、宇宙に存在するバリオンの大部分の存在形態と物理的状态を明らかにし、過去の星生成活動を含めた銀河進化や非熱的過程をも考慮に入れた宇宙の大局的なエネルギーの流れ、および物質循環の解明を世界に先駆けて目指す。現在の世界的現状でも、銀河や銀河団の周辺部や大規模構造に沿った“ダーク”バリオンの探査は宇宙物理学に残された最も重要な問題として認識されており、NASA Decadal Survey (Walker et al. AAS, 2019)や ESA's Voyage 2050 (Simionescu et al. arXiv:19080177)にも取り上げられ、2040-2050 年代に実現すべき大型ミッションとして提案されている。我々は世界に先駆け、これまで培った X 線マイクロカロリメータ、冷却システム、X 線望遠鏡、及び衛星システム技術の開発経験を活かして、2030 年代初頭での衛星計画(Super DIOS)実現を目指しリサーチグループの立ち上げを提案する。我々は 2000 年代初頭より小型衛星 DIOS (PI: 大橋)を提案し、宇宙の大規模構造に沿って分布する中高温銀河間物質(WHIM)の観測を目的に検討を進めてきたが、X 線撮像分光衛星 XRISM の実施に伴う新たな状況を踏まえ一旦ワーキンググループを終了した。しかし、宇宙物理学の中で広視野 X 線分光ミッションのもたらす科学的価値は高く、2020 年代に計画される可視光や電波による宇宙の大規模サーベイ計画や近年発展著しい宇宙論的シミュレーションの知見を鑑みつつ、X 線を用いた宇宙のバリオン探査へ向けた検討を再スタートさせるものである。

http://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/open_wg.html

RG活動期間の目標と活動内容

1. 観測を主体とする科学目標達成のために必要な観測感度等の定量的把握

- ✓ 宇宙論的データベースを用いた定量的評価
- ✓ 2020年代の可視光/電波の広域サーベイ計画を考慮した観測戦略の立案

2. 観測感度を達成できる観測戦略と検出器性能の検討によるミッションコンセプトの設定

- ✓ 検出器性能とfeasibility の検討
- ✓ 産業技術総合研究所など地上実験で高度な技術をもつグループとの協力
- ✓ 海外の機関との協力関係の構築

ミッションコンセプトが設定出来次第、ワーキンググループへ移行

バリオン探査衛星計画

- ・XRISM計画により旧DIOS計画はキャンセルとなったが、宇宙のバリオン探査は宇宙物理学に残された重要課題
- ・XRISM/Athenaの観測を補完し、宇宙の広い領域でバリオンを定量的に観測するには、**広視野/高空間撮像分解能力/高エネルギー分光能力**が必要

	Year	Detector	FOV	Ang. Resol.	Aera (cm ²)	Grasp (cm ² deg ²)
eROSITA	2019	pn-CCD	1 deg.	16-28 arcsec	1500	1500
XRISM	2022	CAL/CCD	3'/38'	2 arcmin	~350	1/90
Athena	2031	TES/DEPFET	5'/40'	5 arcsec	~15000	100/6500
HUBS	2030's	TES	1 deg.	~1 arcmin	~1000	~1000
Super DIOS	2030's	TES	0.5-1 deg.	~10 arcsec	>1000	300-1000

ダークバリオン観測は世界的にも2040-50年代に 実現されるべき大型ミッションとして提案

- NASA's Decadal Survey (Walker et al., AAS, 2019)
- ESA's Voyage 2050 (Simionescu et al. arXiv:19080177)

Astro2020 Science White Paper

Unveiling the Galaxy Cluster – Cosmic Web Connection with X-ray observations in the Next Decade

Principal Authors:

Name: Stephen A. Walker¹, Daisuke Nagai²

Institution: 1) NASA GSFC, 2) Yale University,

Email: stephen.a.walker@nasa.gov; daisuke.nagai@yale.edu

Phone: +1 (301) 286-9882; +1 (203) 432-5370

Co-authors: A. Simionescu (SRON), M. Markevitch (NASA GSFC), H. Akamatsu (SRON), M. Arnaud (CEA), C. Avestruz (U.Chicago), M. Bautz (MIT), V. Biffi (CfA), S. Borgani (UniTS/INAF), E. Bulbul (CfA), E. Churazov (MPA), K. Dolag (USM/MPA), D. Eckert (MPE), S. Ettori (INAF), Y. Fujita (Osaka), M. Gaspari (Princeton), V. Ghirardini (CfA), R. Kraft (CfA), E. T. Lau (Miami), A. Mantz (Stanford), K. Matsushita (TUS), M. McDonald (MIT), E. Miller (MIT), T. Mroczkowski (ESO), P. Nulsen (CfA), N. Okabe (Hiroshima), N. Ota (Nara), E. Pointecouteau (IRAP), G. Pratt (CEA), K. Sato (Saitama), X. Shi (SWIFAR), G. Tremblay (CfA), M. Tremmel (Yale), F. Vazza (Bologna), I. Zhuravleva (U.Chicago), E. Zinger (Heidelberg), J. ZuHone (CfA)

Baseline plan of Super DIOS

Super DIOS performance

Weight	2000-3000 kg
Rocket	H2-H3
Area at 0.6 keV	> 1000 cm ²
Focal length	about 3-4 m
Angular resolution	~10 arcsec
Energy resolution	< 2 eV @ 1 keV
TES pixels	~30000
Field of view	0.5 - 1 deg.

Instruments (TBD for detail after feasibility study based on simulations):

- ✓ 1 TES array with 30,000 pixels, cooled by a cryogen-free cooling system
- ✓ Microwave SQUID multiplexer (MUX) TES readout system
- ✓ 1 XRT, covering 0.5-1 deg. FOV with ~10" angular resolution and effective area > 1000 cm² @0.6 keV
- ✓ 1 Gamma-ray burst detector with fast repointing system

Launch:

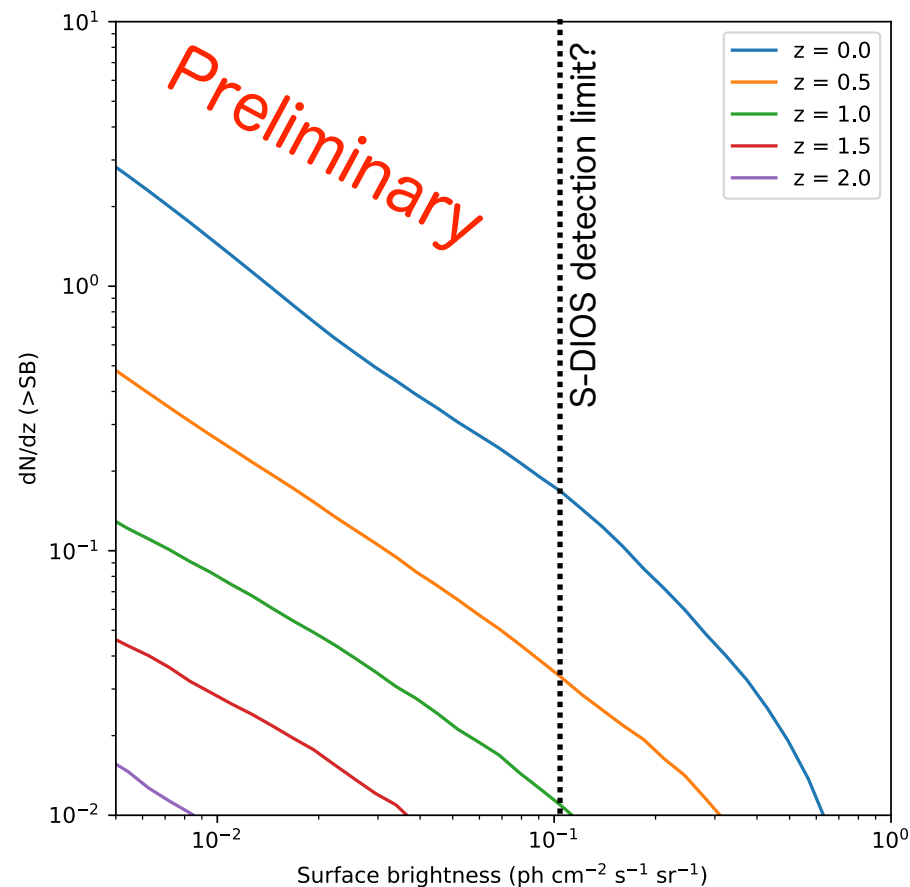
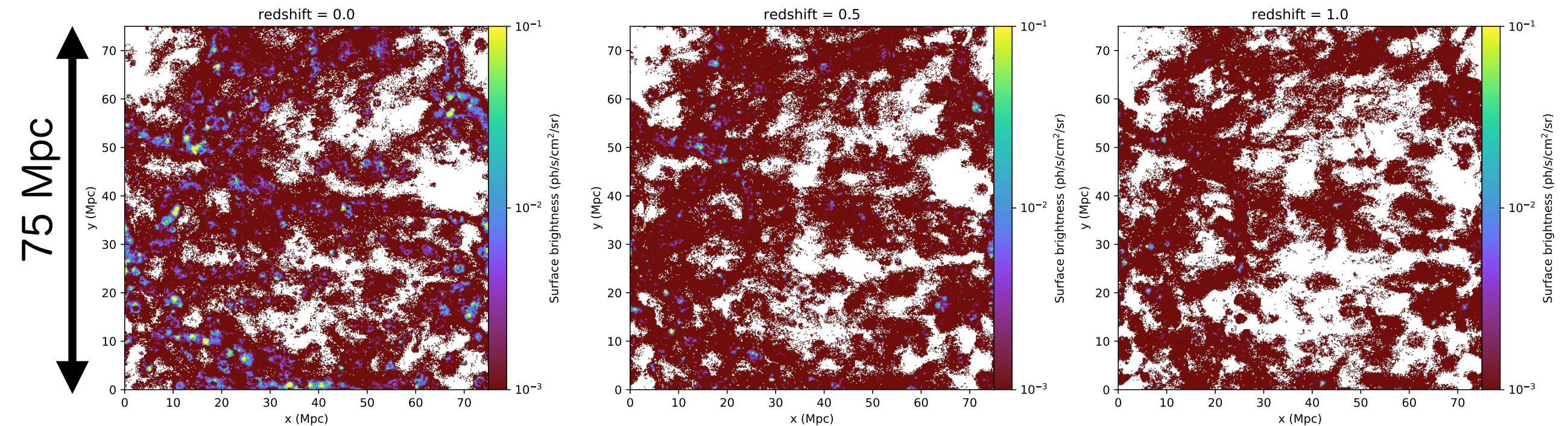
- ✓ Satellite mass will be 2000-3000 kg
- ✓ Launch year will be >2030

Study team:

- ✓ International study team with Japan, US, and Europe(TBD)

Feasibility study with “Illustris-TNG” (Pillepich+18)

OVII surface brightness in $z=0, 0.5$ and 1



Based on simulations

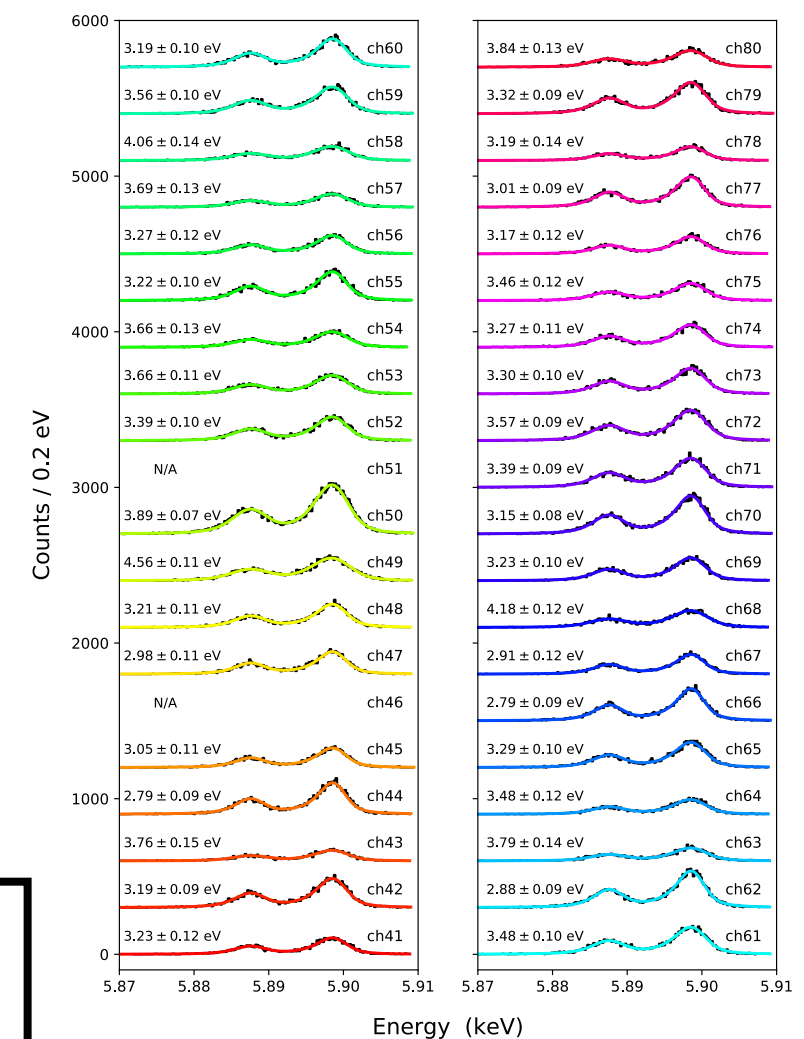
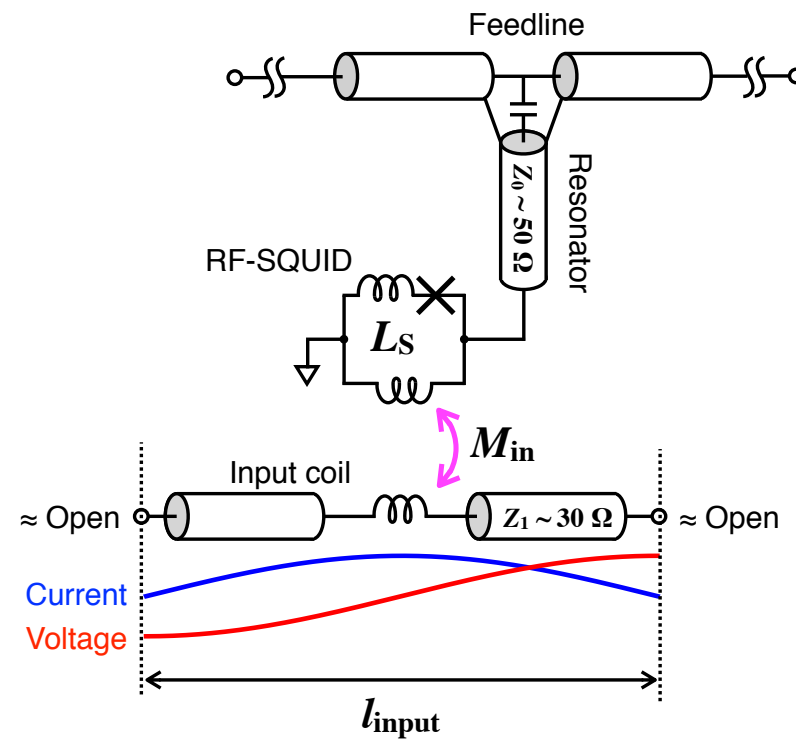
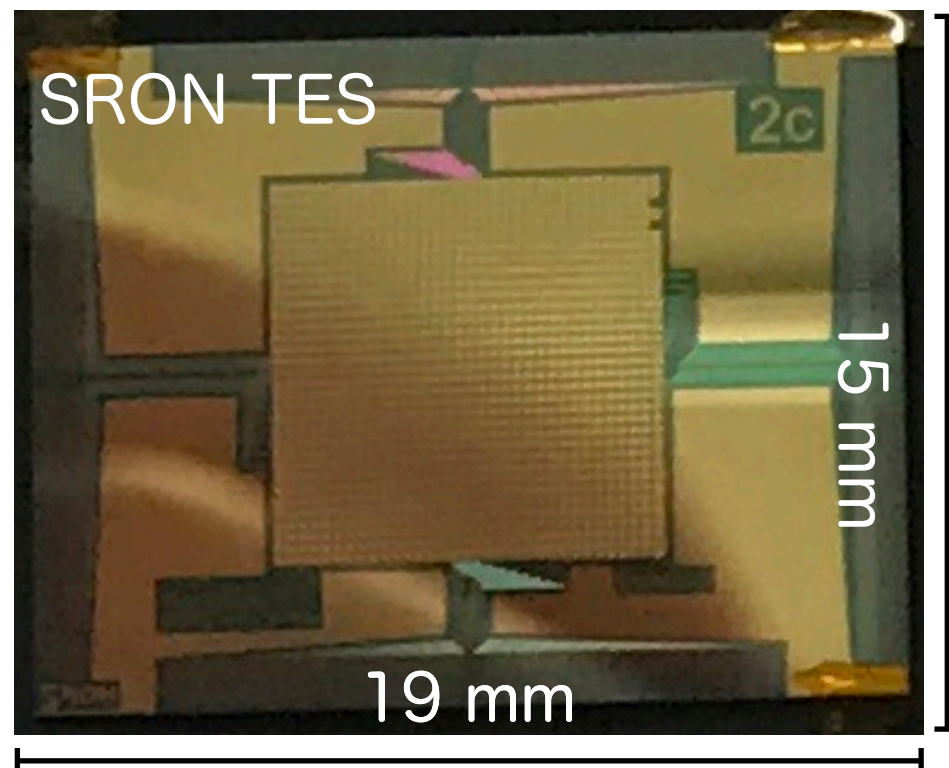
- ✓ Quantifying what fraction of “dark baryon”
- ✓ Fractions of X-ray signals arising from ICM, CGM, and WHIM components
- ✓ Feasibility study with mock X-ray spectra with detector responses to determine requirements for detector performances

Works in progress by Y. Ichinohe & Y. Uchida

TES readout system (Microwave SQUID MUX)

	Detector	Pixels	ΔE	Readout
Athena	TES	3,840	< 2.5 eV	TDM/FDM
Super DIOS	TES	$\sim 30,000$	< 2 eV	Microwave SQUID MUX

Nakashima et al., Applied Physics Letters, 2020



38画素同時読み出し(配線数6!)で
高い分解能(中央: 3.3 eV, 最高: 2.8 eV)

現在は80画素同時
読み出しを試験中

We are working on developments of Microwave SQUID MUX readout system
with JAXA/AIST/TMU/Rikkyo/Saitama Univ and SRON.

高結像性能・大有効面積電鍍光学系開発の現状 (名大)

要求仕様が大幅に変わり、設計や開発体制の構築から着手

→独自の国産次世代高性能電鍍光学系の開発をスタート

要求

◆ $< \sim 10$ 秒角 (要検討)

◆ $> 1000 \text{ cm}^2$ @0.6 keV

→ Wolter 型大有効面積光学系が必須

▶ 国産の高性能電鍍光学系の開発に着手

▶ 小口径サンプル鏡設計・試作・形状評価まで完遂

▶ 周方向の形状精度は本手法世界最高レベル (< 1 秒角)
母線方向の形状補正加工法の確立

▶ X線評価@SPring-8 予定 (2020 年内)

▶ 1枚反射鏡支持機構の基礎設計完了 & 試作中

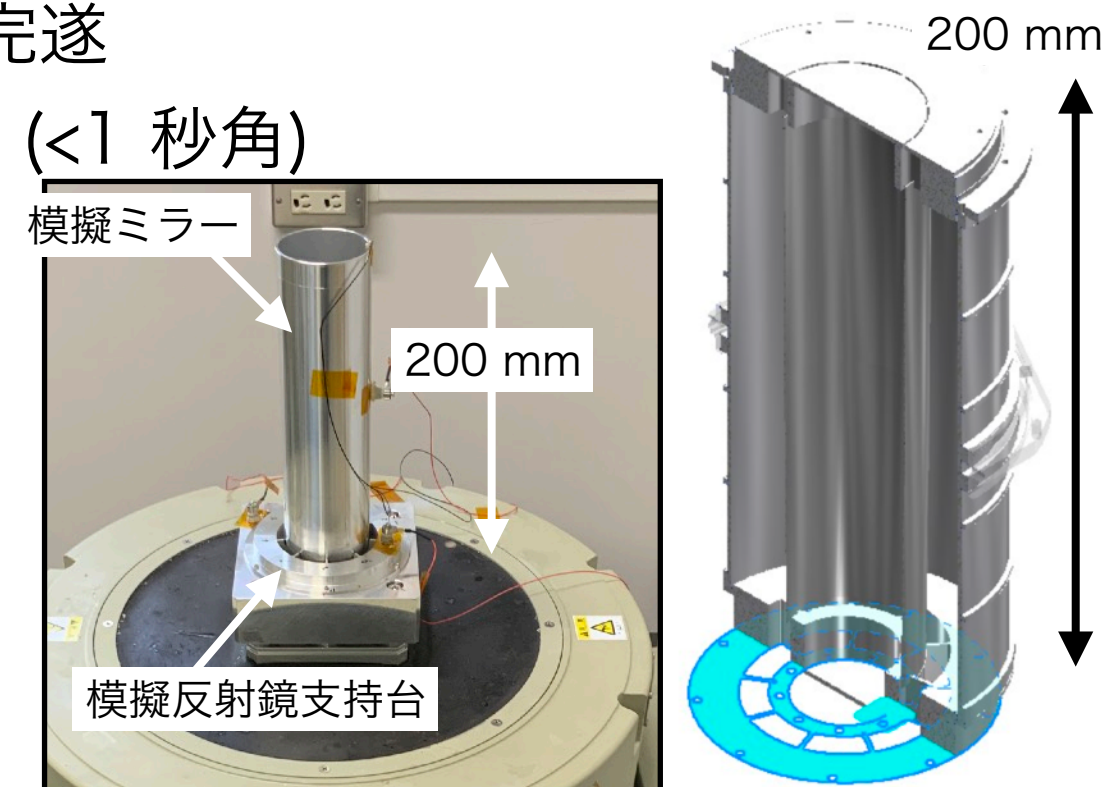
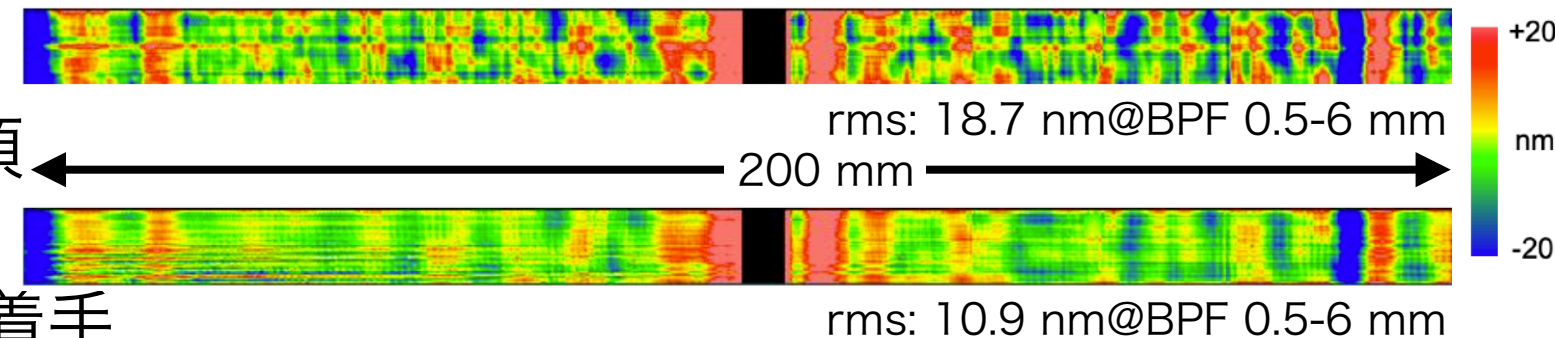
▶ 接着剤や接着方法の検討

▶ 模擬サンプルによる振動試験の実施

▶ 環境耐性評価システムの構築

▶ 年度内に反射鏡との組み合わせ評価試験

Wolter 型マンドレルの形状補正前 (上) と後 (下) の母線方向形状誤差プロファイル 夏目光学 & 東京大学三村グループ提供



模擬サンプルを用いての振動試験の様子@名大
(左) と支持機構デザイン (右)

要求性能は上がったものの、国産光学系も視野に入れ着実に開発は進んでいる

Summary & future work

- ✓ Our project was accepted for establishing the research group in ISAS/JAXA
- ✓ **Super DIOS** will enable us to resolve not only dark baryons but also “low X-ray surface brightness diffuse” objects such as cluster outskirts, galaxies, and their halos over several scales
- ✓ We have started discussions to quantify what fraction of “dark baryons” based on cosmological simulations
- ✓ The first simulation paper on the scientific feasibility study for **Super DIOS** based on simulations will be submitted soon
- ✓ Instrumental performance requirements will be determined based on the feasibility study with mock X-ray spectra taking into account detector responses in future work
- ✓ Developments of TES readout system and X-ray mirror candidates are ongoing
- ✓ Synergy with other missions should be discussed