

# What is dark matter?

Comprehensive study of the huge  
discovery space in dark matter

PI: Hitoshi Murayama (Kavli IPMU, Berkeley)

February 6, 2021



# ダークマターの正体は何か？

広大なディスカバリースペースの網羅的研究

領域代表：村山齊（東大 Kavli IPMU、Berkeley）

2020年10月6日



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



KAVLI  
IPMU

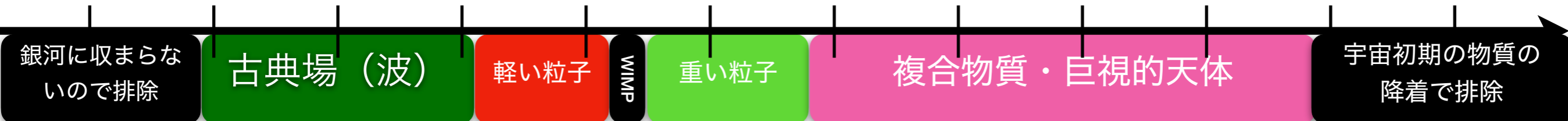
提案のポイント：**ダークマター**は**存在**するが、**未知の物質**

今までの探索は**ごくわずかな質量範囲**に集中

ニュートリノ 電子陽子 細菌 蚊 人間 富士山 地球 太陽

ダークマターの質量 [GeV/c<sup>2</sup>]

10<sup>-40</sup> 10<sup>-30</sup> 10<sup>-20</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>10</sup> 10<sup>20</sup> 10<sup>30</sup> 10<sup>40</sup> 10<sup>50</sup> 10<sup>60</sup> 10<sup>70</sup>



素粒子

本領域

広大なディスカバリースペース

MB  
ズ  
観測

今まで理論的な偏見に囚われて見てこなかった

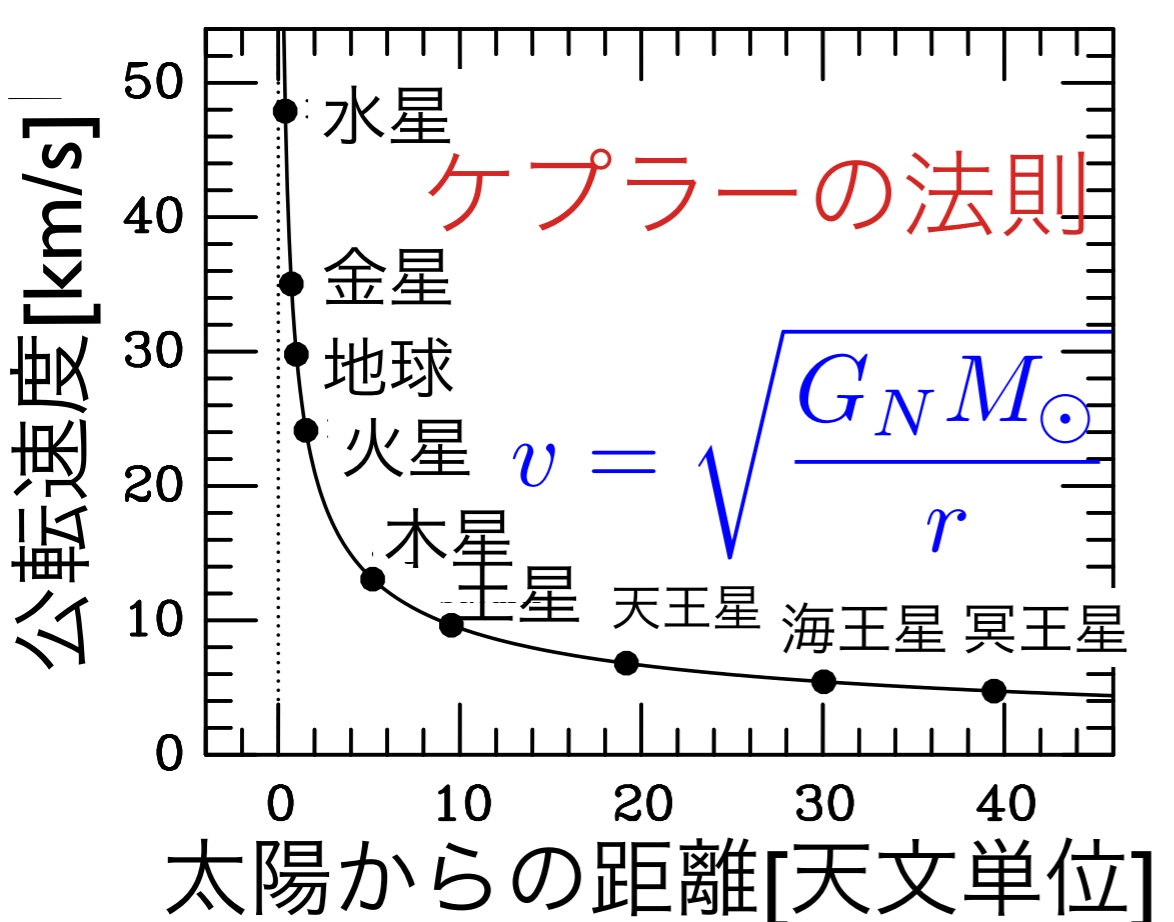
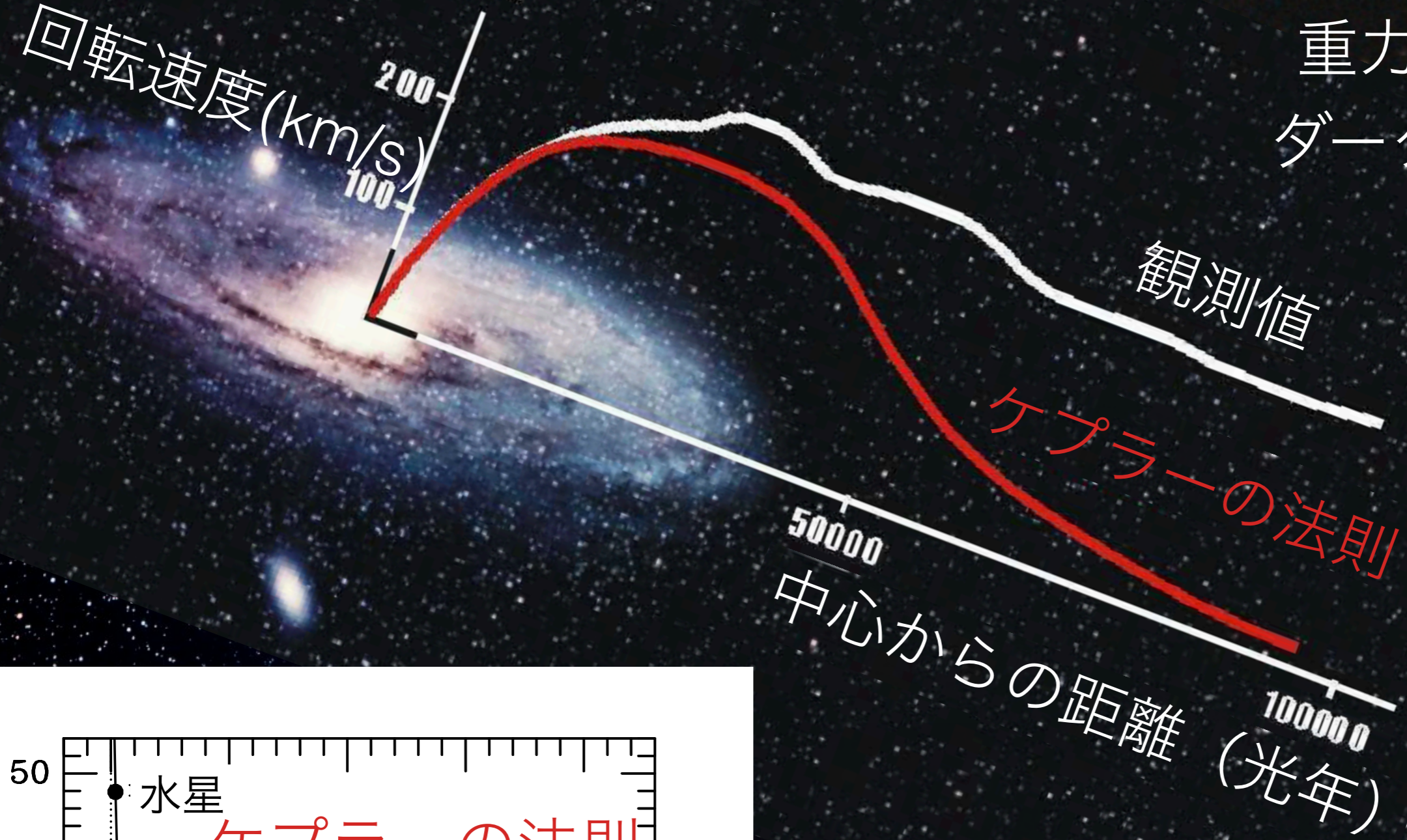
**ディスカバリースペース**にアタック

日本発で世界の**ダークマター研究**を**変革**

既存分野の壁を破る**横断的研究**

**既存設備**を本来の目的とは異なる形で**有効活用**し、**世界をリード**

重力の修正？  
ダークマター？



Vera Rubin



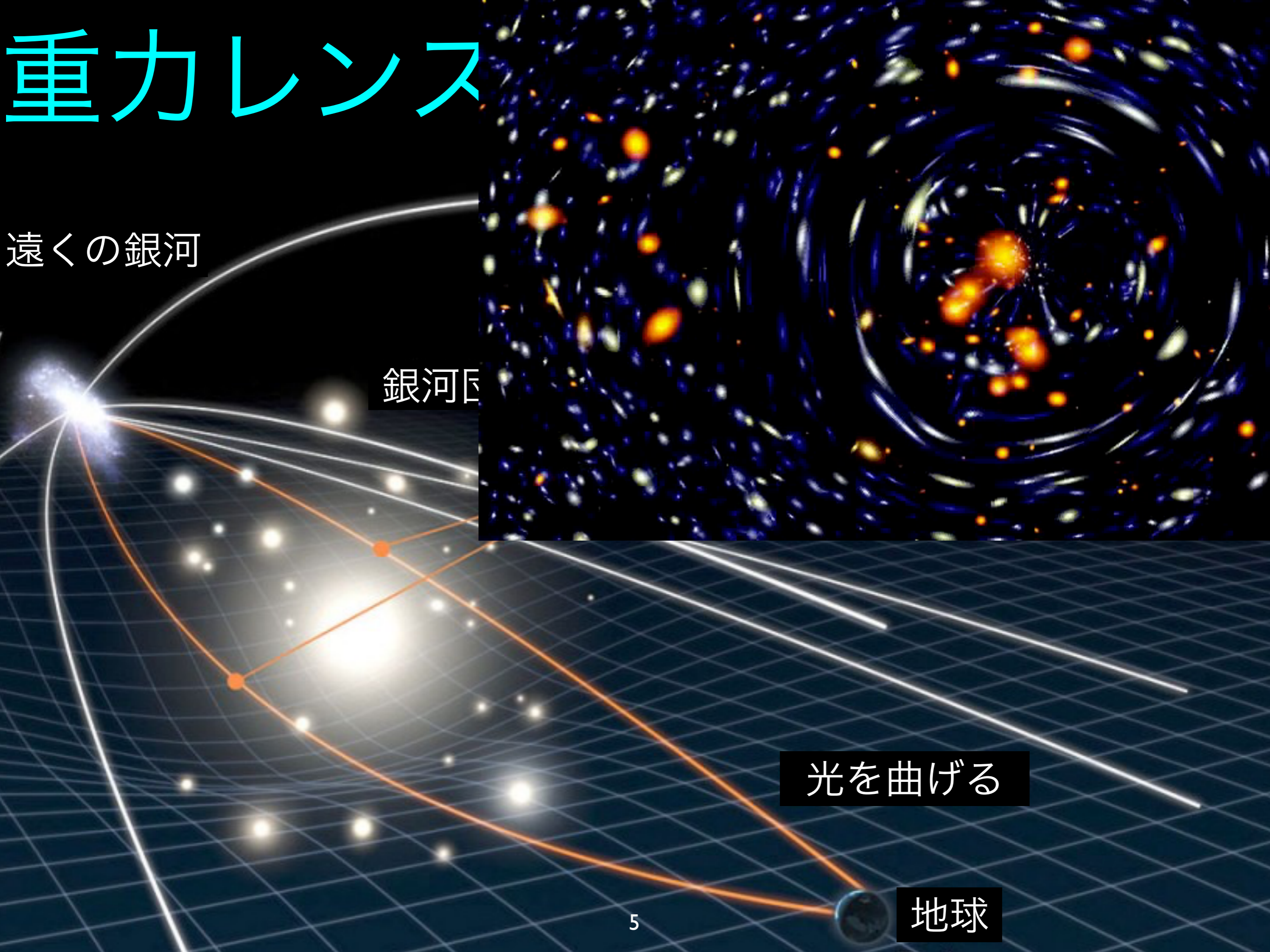
# 重力レンズ

遠くの銀河

銀河団

光を曲げる

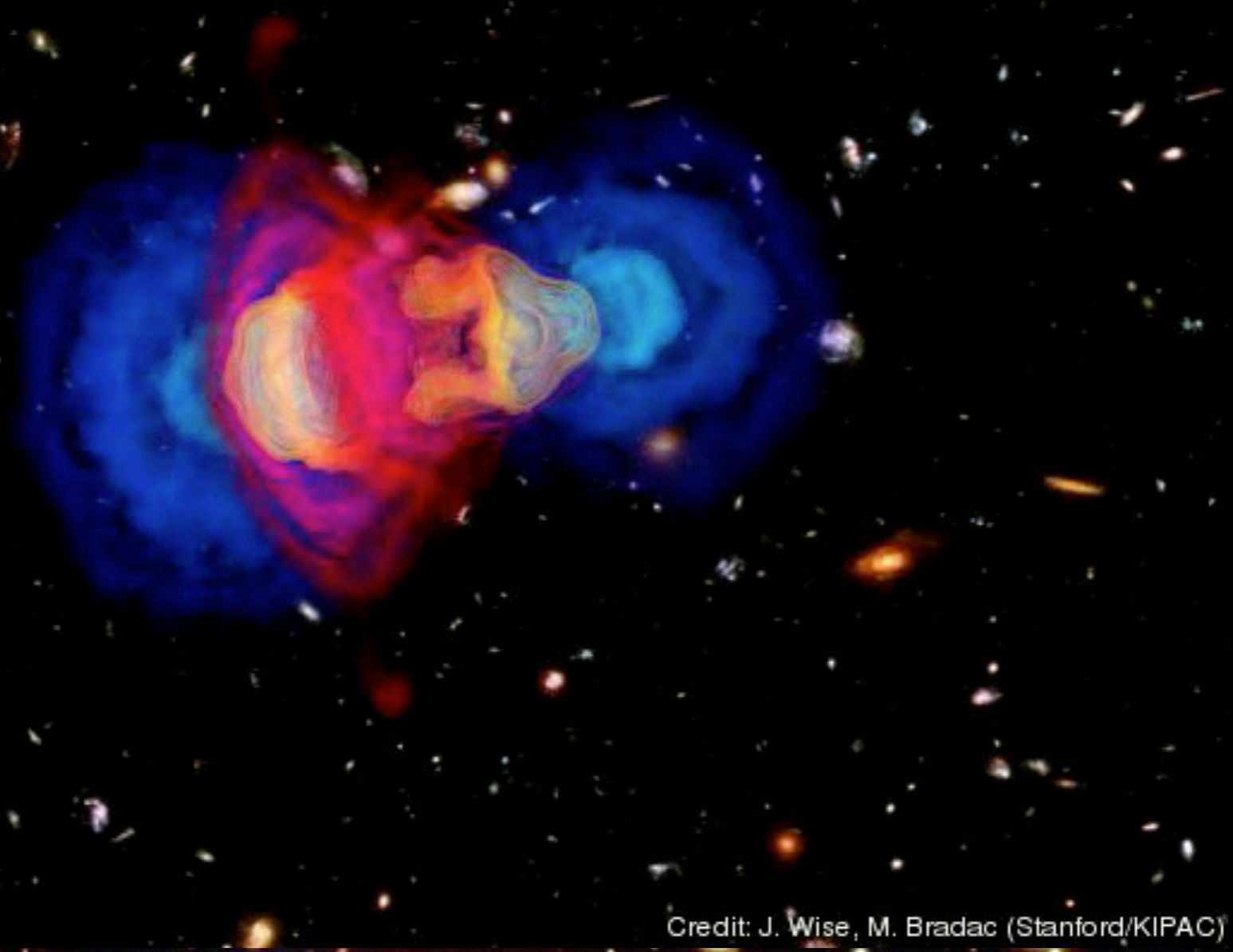
地球



# 弾丸銀河団

地球から40億光年  
毎秒約4500 kmで銀河団が衝突

重力の修正では  
説明できない  
ダークマターは  
確実にあるが  
原子ではない  
幽霊のような物質



Credit: J. Wise, M. Bradac (Stanford/KIPAC)

ピンクはX線で  
観測される高温のガス

青は重力レンズで  
観測されるダークマター

# ダークマターは 私たちの生みの母



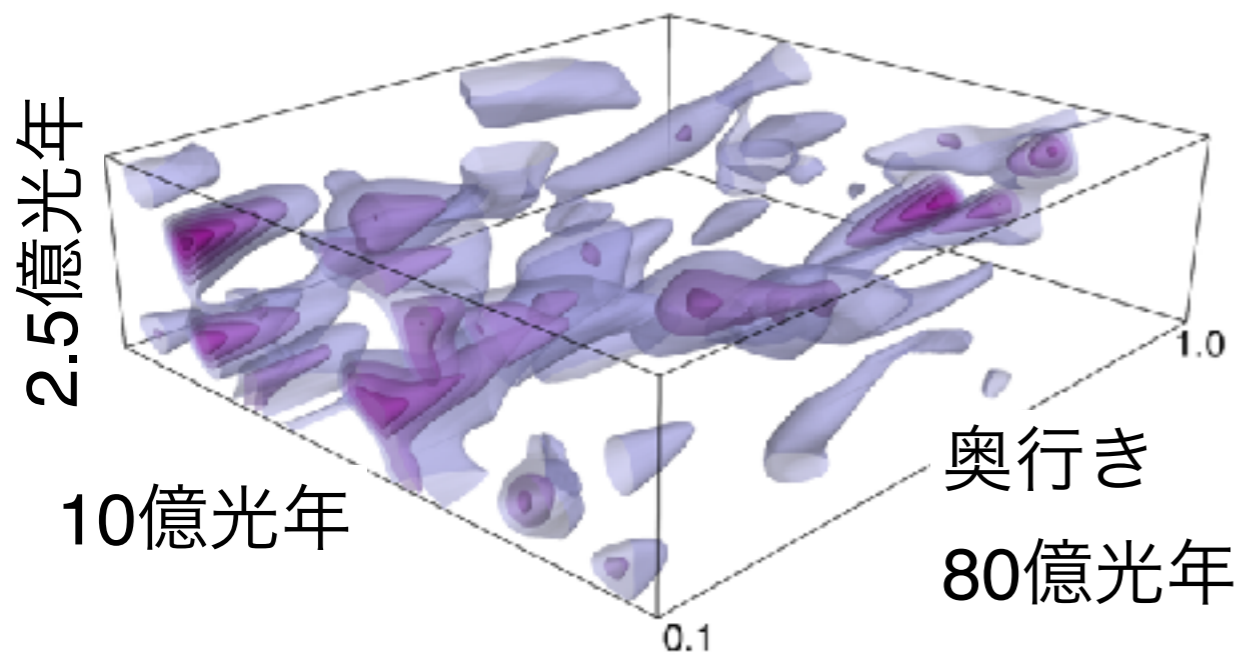
Jim Peebles  
2019年ノーベル物理学賞  
構造形成理論

ダークマターなし

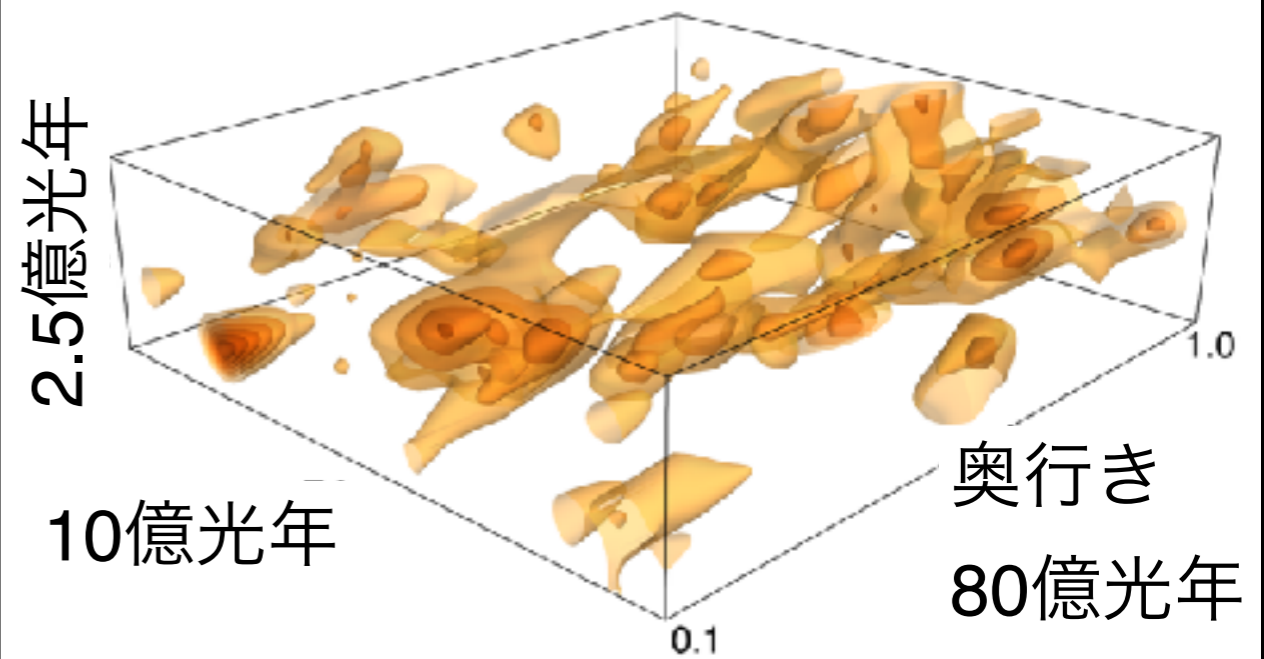
ダークマターあり

# 確かにお母さん！

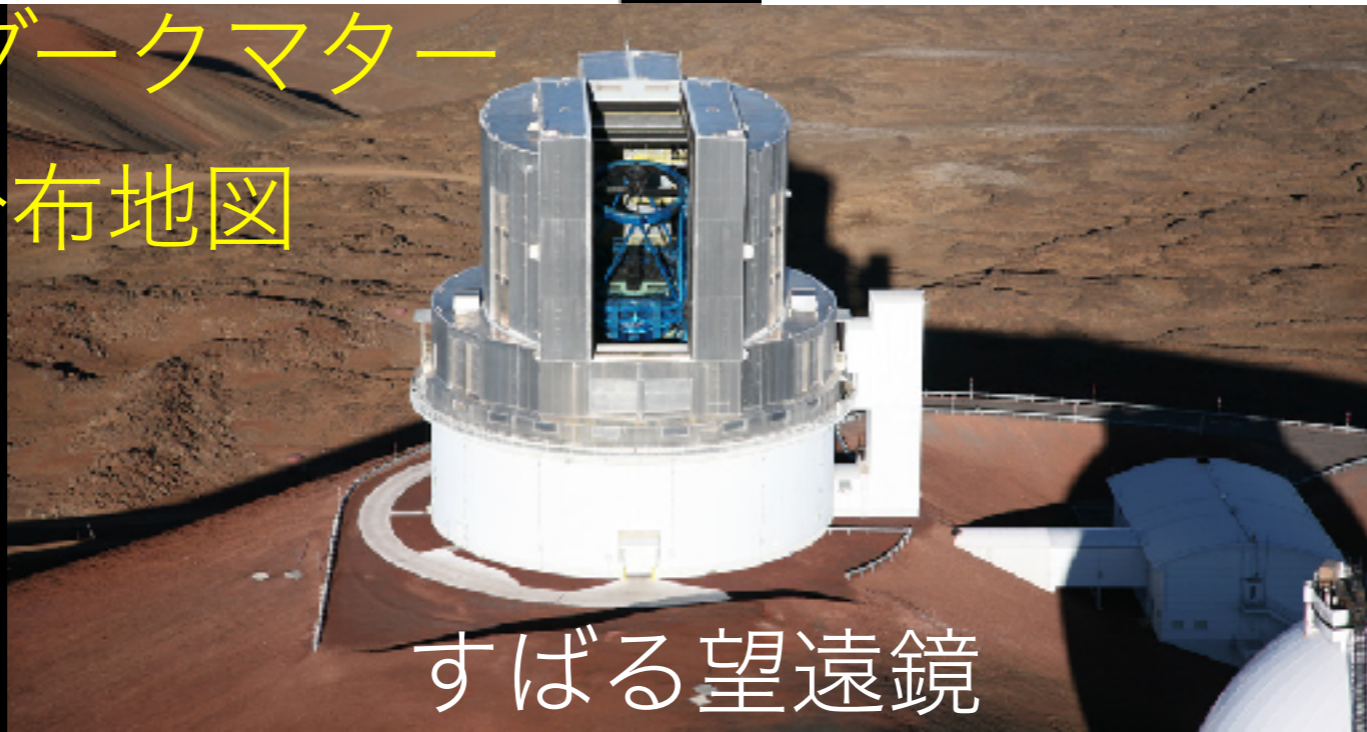
ダークマター



銀河



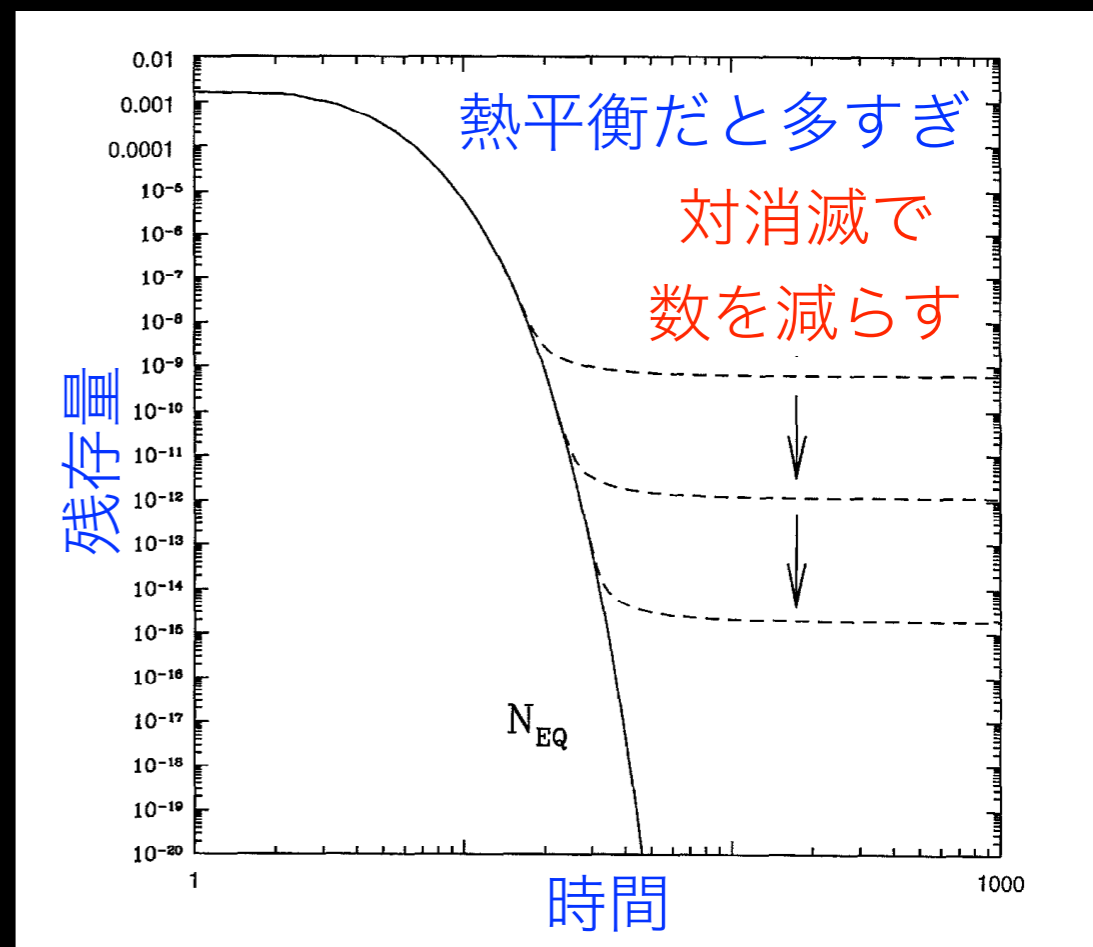
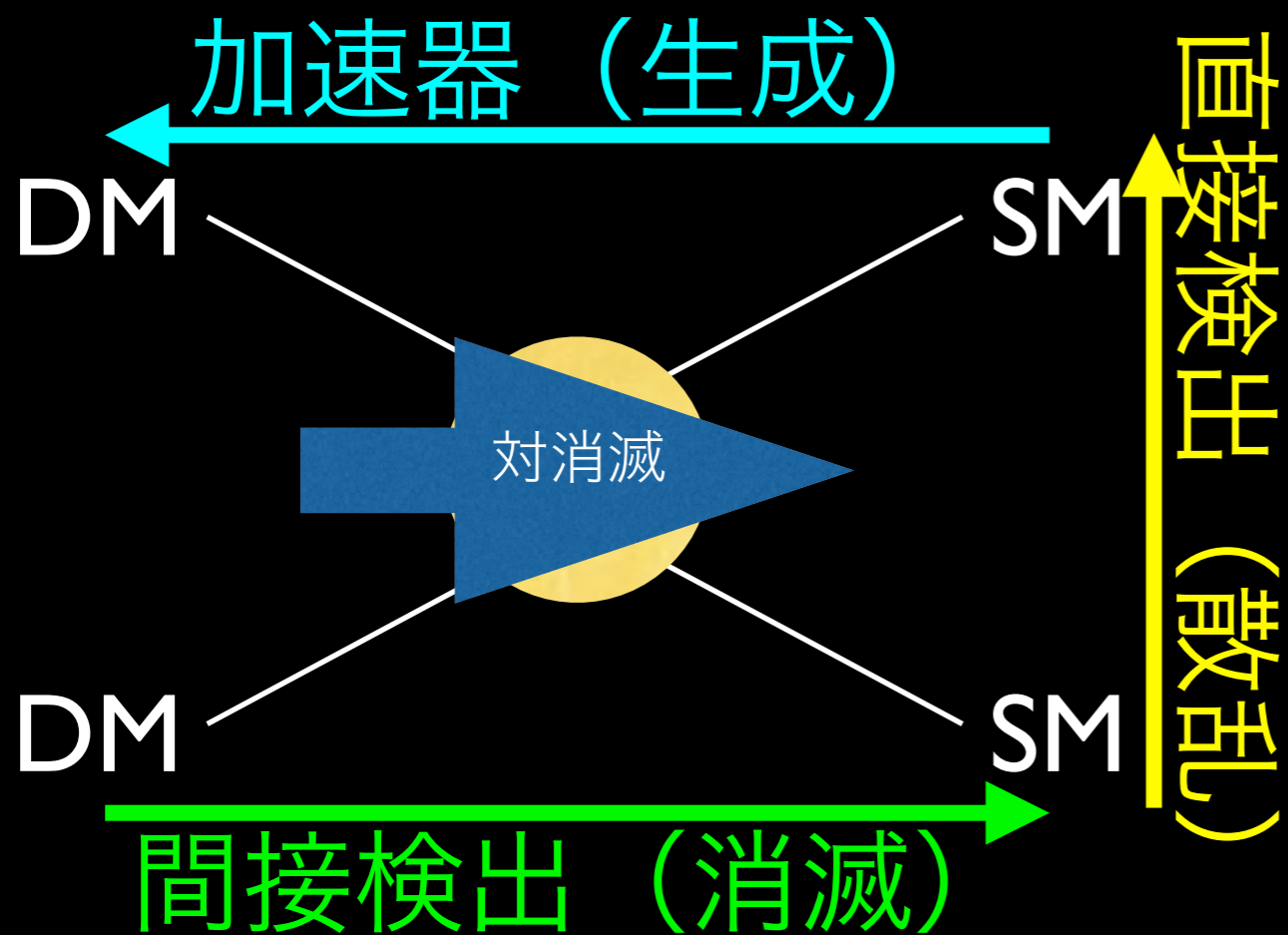
世界最大のダークマター  
3次元分布地図



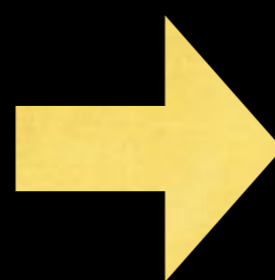


# 今までの定説：WIMP

## Weakly Interacting Massive Particle



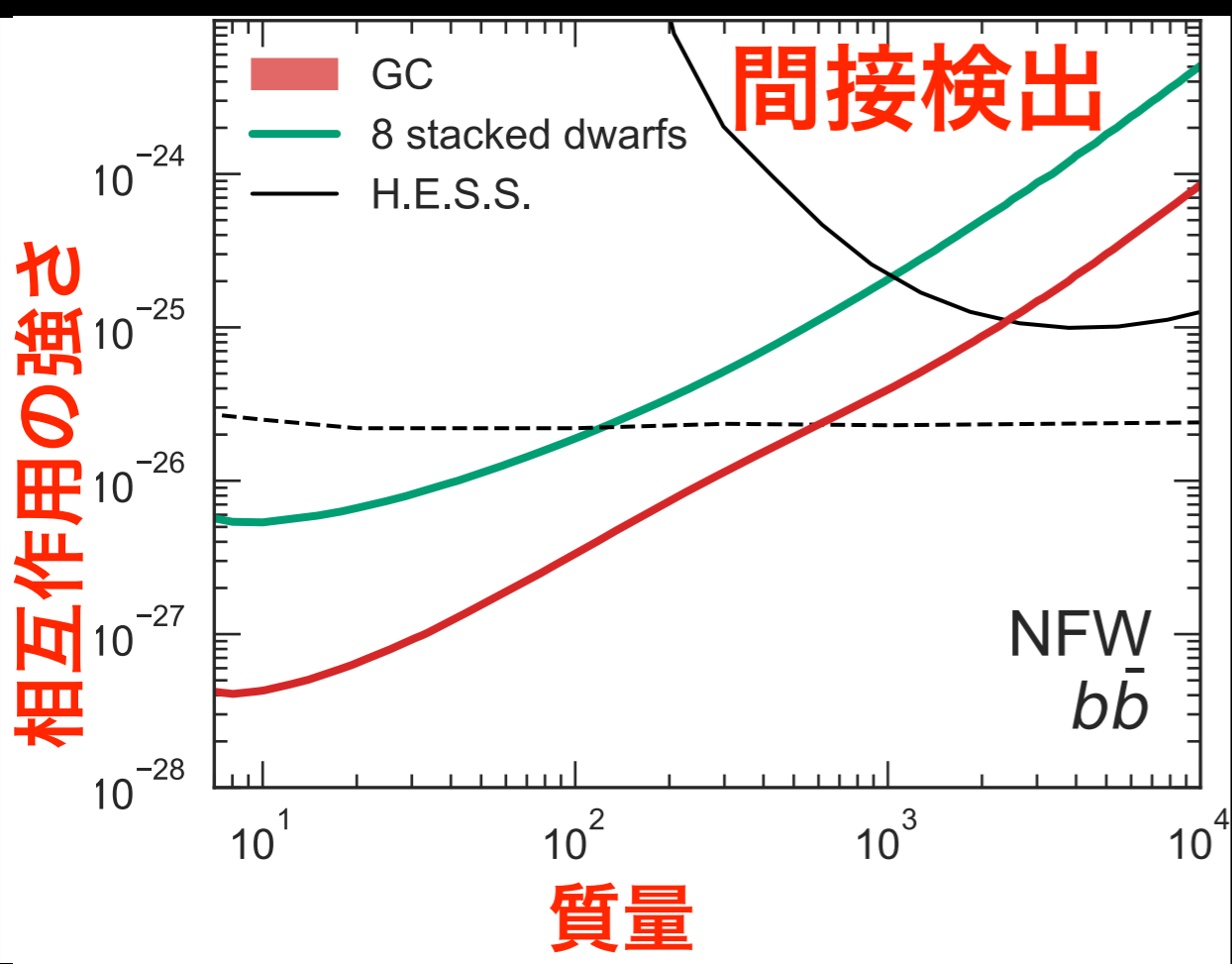
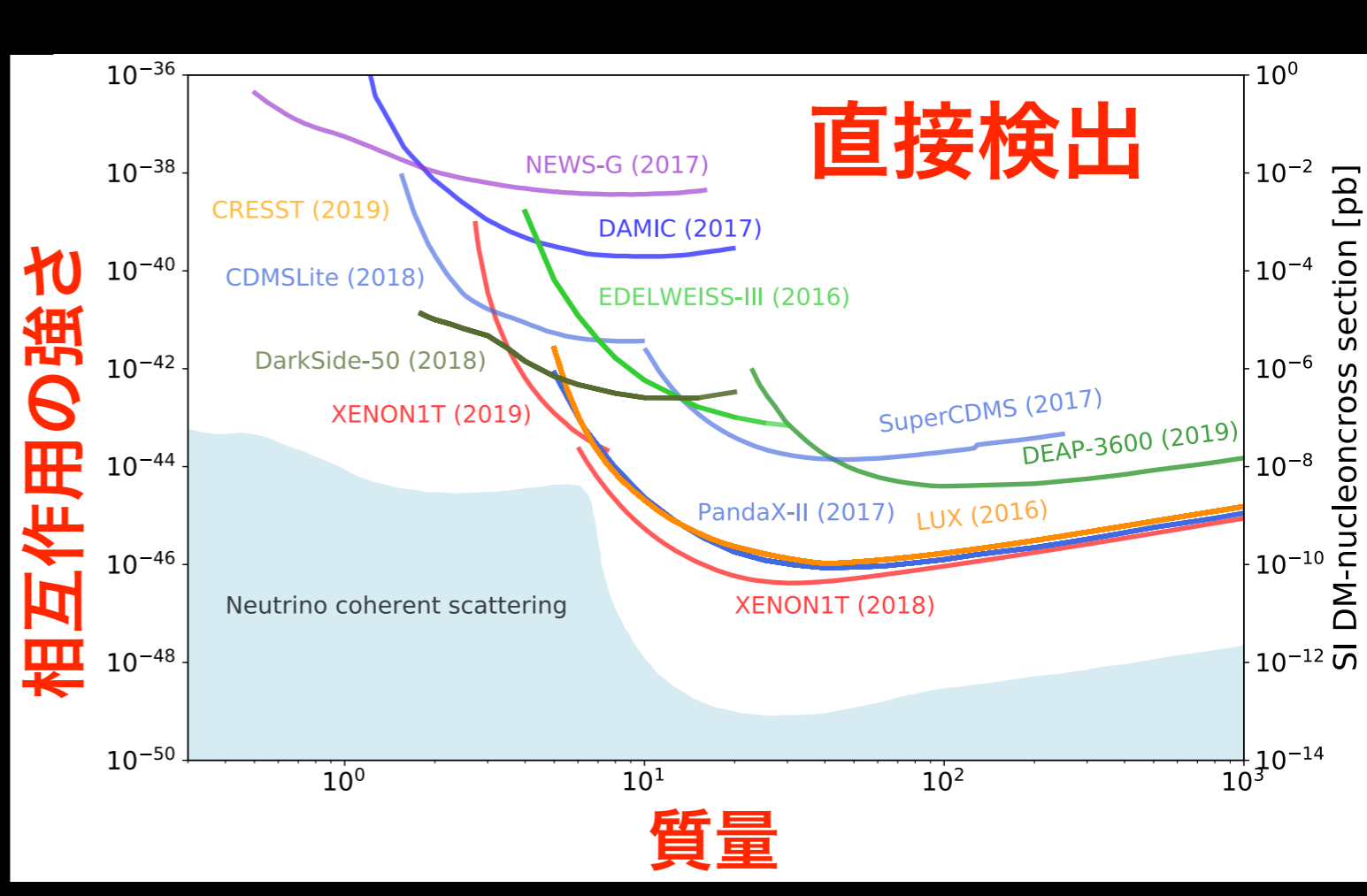
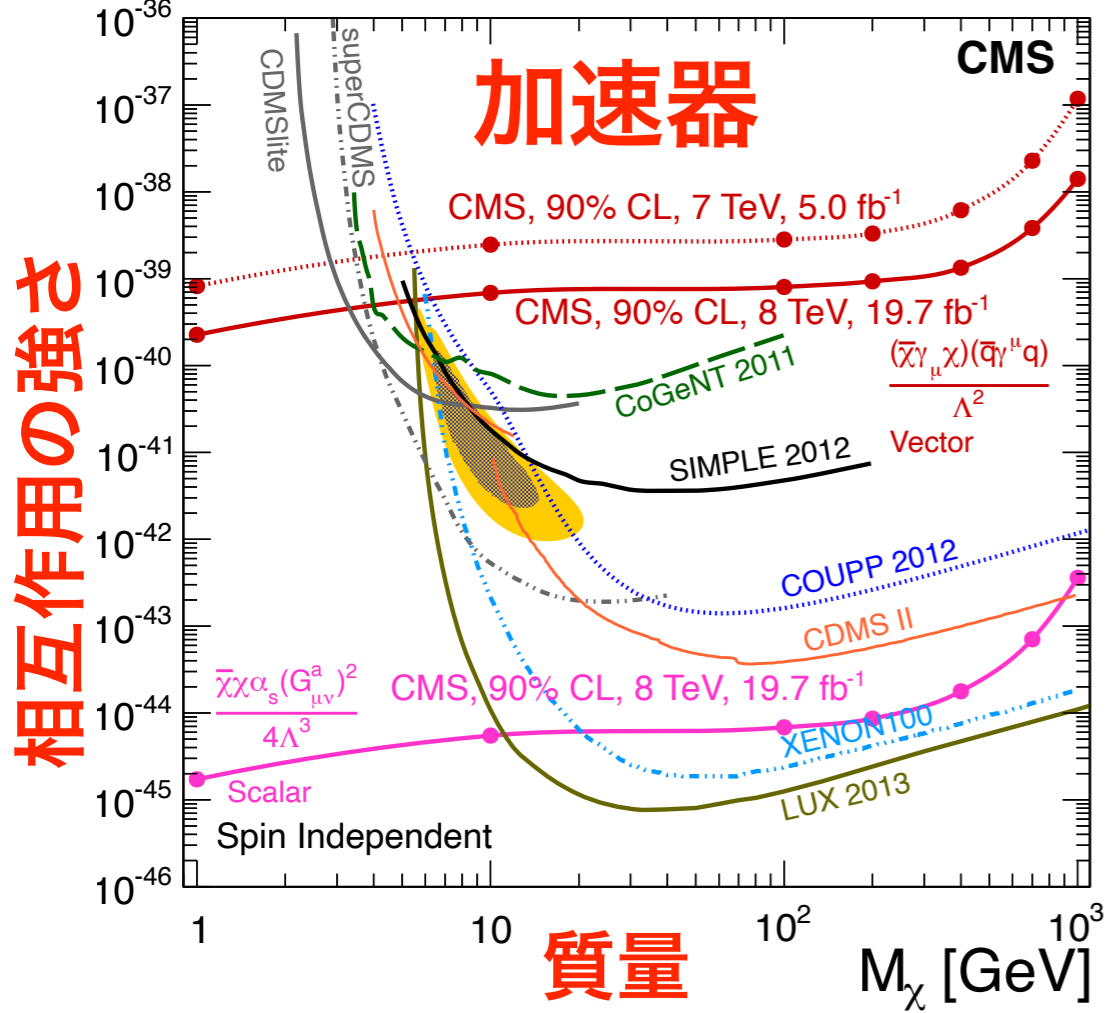
相互作用の強さ  
エネルギースケール



「弱い相互作用」程度で  
ちょうどいい残存量

理論的に美しい仮説、質量は10~1000GeVを予言

しかもLHCや地下実験に都合の良い質量範囲



WIMP: 理論的に美しい仮説  
 質量範囲10~1000 GeVを予言  
 実験はほぼこの範囲のみに集中  
 それでも見つからない  
 反省: もっと広く調べるべき



# 戦略



- 世界競争力のある新しい設備は >100億円規模
- 日本の素晴らしい既存設備を新しい形で活用
  - 本来の目的とは全く異なる有効利用
- B01 : KAGRA (東大) ブラックホールの合体
- B02, B03 : すばる望遠鏡 (国立天文台) 銀河進化
- B04 : XRISM (JAXA) 超新星残骸
- B05 : Belle II (KEK) CPの破れ
- B06 : Simons Array (KEK, IPMUなどを含む国際共同研究) インフレーションの検証

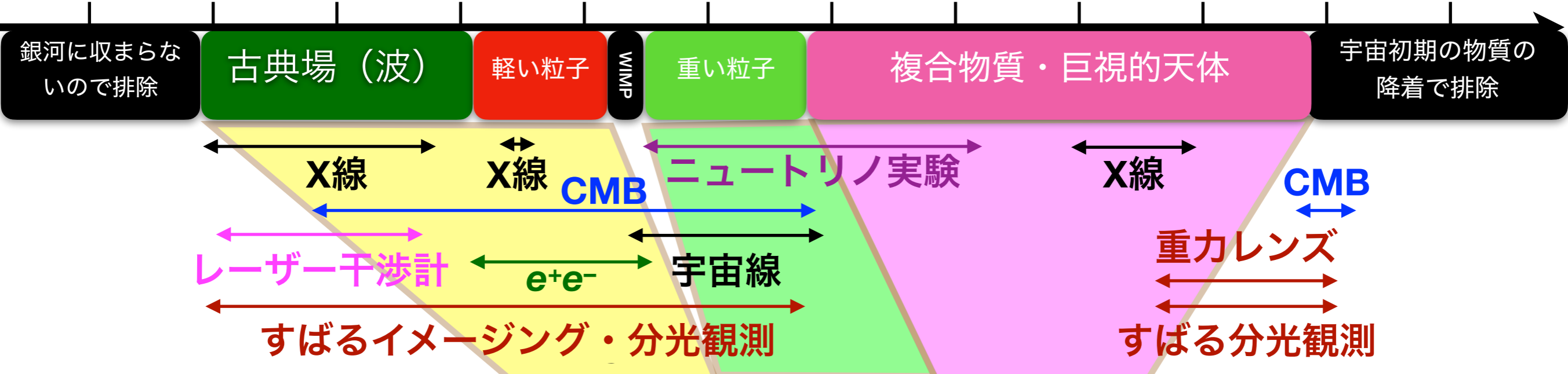


[X00] 総括班 村山 (KIPMU)	[A01]軽いDM 高橋 (東北大)	[A02]重いDM 村瀬 (PSU)	[A03]マクロDM 柳 (名古屋大)	[C02]宇宙構造形成理論 安藤 (アムステルダム大)
[B01] レーザー干渉計 道村 (東大)	axion, dilaton (円偏光)	背景重力波 (相転移など)	背景重力波 (inflationなど)	
[B02] すばる分光 高田 (KIPMU)	fuzzy DM, SIDM 3D DM地図	矮小銀河内の対消滅 3D DM地図	PBH, UCMH, DM subhalo, 3D DM地図	
[B03] イメージング 宮崎 (NAOJ)	DM subhalo DM地図	DM subhalo DM地図	PBH, UCMH (重カマイクロレンズ)	
[B04] X線 山崎(典) (ISAS)	sterile neutrino moduli (輝線、連続光)	ダークマター崩壊 (輝線、連続光)	PBH蒸発 (X線背景放射)	
[B05] $e^+e^-$ 加速器 西田 (KEK)	dark photon SIMP	高エネルギーの間接検証 (余剰次元、Higgs)	高エネルギーの間接検証 (余剰次元、Higgs)	
[B06] CMB 小松 (MPA)	axion (CMB偏光)	宇宙初期の対消滅 $N_{\text{eff}}$	PBH ( $\tau$ )	
[C01]量子重力理論 山崎(雅) (KIPMU)				

ニュートリノ 電子陽子 細菌 蚊 人間 富士山 地球 太陽

# ダークマターの質量 [GeV/c<sup>2</sup>]

10<sup>-40</sup> 10<sup>-30</sup> 10<sup>-20</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>10</sup> 10<sup>20</sup> 10<sup>30</sup> 10<sup>40</sup> 10<sup>50</sup> 10<sup>60</sup> 10<sup>70</sup>



レーザー干渉計  
 ずばる分光観測  
 ずばるイメージング  
 X線人工衛星  
 e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>加速器  
 宇宙背景輻射

[X00] 総括班 村山 (KIPMU)	[A01] 軽いDM 高橋 (東北大)	[A02] 重いDM 村瀬 (PSU)	[A03] マクロDM 柳 (名古屋大)
[B01] レーザー干渉計 道村 (東大)	axion, dilaton (円偏光)	背景重力波 (相転移など)	背景重力波 (inflationなど)
[B02] ずばる分光 高田 (KIPMU)	fuzzy DM, SIDM 3D DM地図	矮小銀河内の対消滅 3D DM地図	PBH, UCMH, DM subhalo, 3D DM地図
[B03] イメージング 宮崎 (NAOJ)	DM subhalo DM地図	DM subhalo DM地図	PBH, UCMH (重力マイクロレンズ)
[B04] X線 山崎(典) (ISAS)	sterile neutrino moduli (輝線、連続光)	ダークマター崩壊 (輝線、連続光)	PBH蒸発 (X線背景放射)
[B05] e <sup>+</sup> e <sup>-</sup> 加速器 西田 (KEK)	dark photon SIMP	高エネルギーの間接検証 (余剰次元、Higgs)	高エネルギーの間接検証 (余剰次元、Higgs)
[B06] CMB 小松 (MPA)	axion (CMB偏光)	宇宙初期の対消滅 N <sub>eff</sub>	PBH (τ)
[C01] 量子重力理論 山崎(雅) (KIPMU)			

有機的な連携体制

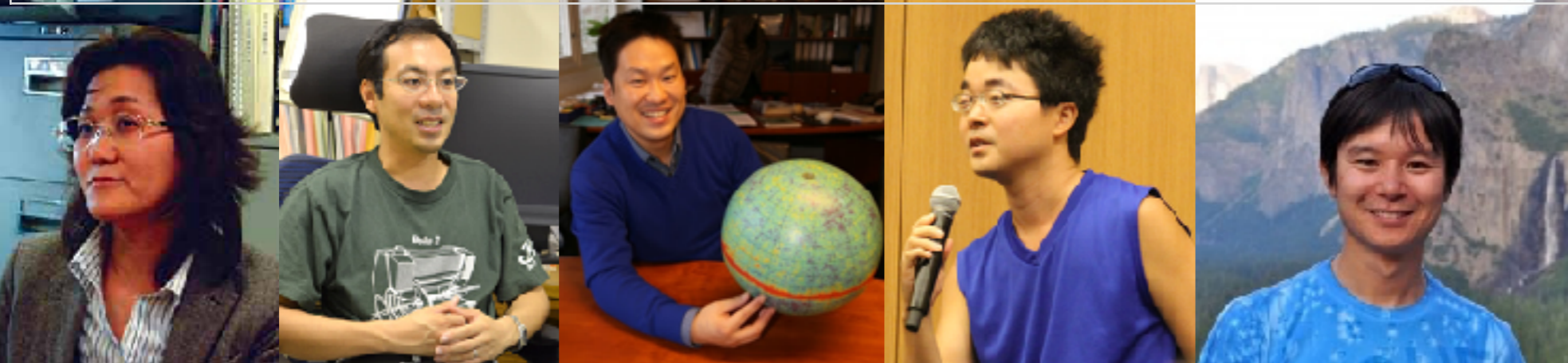
トップダウン型

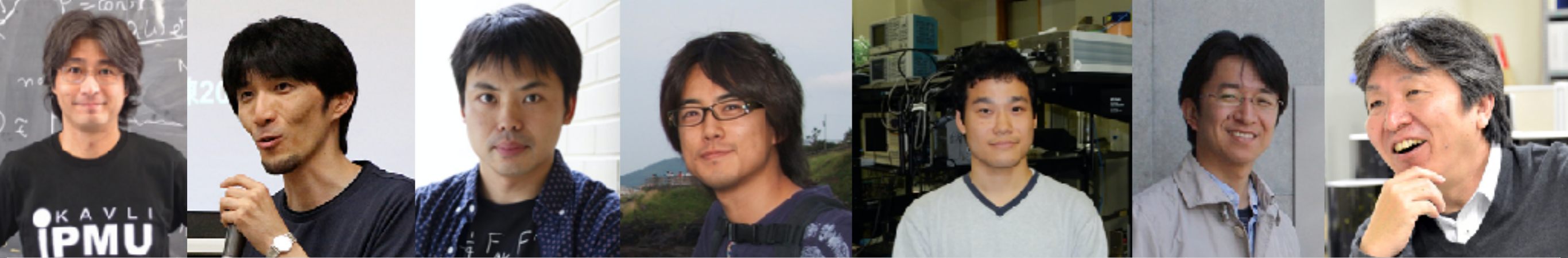
構造形成理論

量子重力理論



総括班	村山 齊	東大カブリIPMU / UC Berkeley	素粒子論・宇宙論
A01	高橋 史宜	東北大学	素粒子論
A02	村瀬 孔大	Penn State / 京大	宇宙物理
A03	柳 哲文	名古屋大	相対論・宇宙論
B01	道村 唯太	東大理学系物理	実験物理
B02	高田 昌広	東大カブリIPMU	宇宙論・宇宙物理
B03	宮崎 聡	国立天文台	観測的宇宙論
B04	山崎 典子	宇宙科学研	実験物理
B05	西田 昌平	KEK	素粒子実験
B06	小松 英一郎	Max Planck / 東大カブリIPMU	宇宙論
C01	山崎 雅人	東大カブリIPMU	超弦理論
C02	安藤 真一郎	Amsterdam / 東大カブリIPMU	素粒子的宇宙論

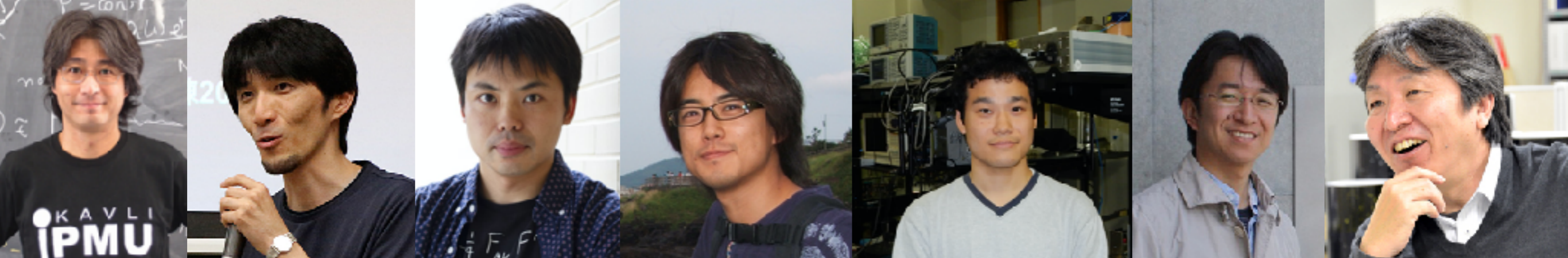




総括班	村山 斉	東大カブリIPMU / UC Berkeley	素粒子論・宇宙論
A01	高橋 史宜	東北大学	素粒子論
A02	村瀬 孔大	Penn State / 京大	宇宙物理
A03	柳 哲文	名古屋大	相対論・宇宙論
B01	道村 唯太	東大理学系物理	実験物理
B02	高田 昌広	東大カブリIPMU	宇宙論・宇宙物理
B03	宮崎 聡	国立天文台	観測的宇宙論
B04	山崎 典子	宇宙科学研	実験物理
B05	西田 昌平	KEK	素粒子実験
B06	小松 英一郎	Max Planck / 東大カブリIPMU	宇宙論
C01	山崎 雅人	東大カブリIPMU	超弦理論
C02	安藤 真一郎	Amsterdam / 東大カブリIPMU	素粒子的宇宙論



若い、国際的  
 ≤45歳  
 海外所属



総括班	村山 齊	米芸術科学アカデミー、独フンボルト研究賞、IPMU初代機構長
A01	高橋 史宜	素粒子メダル奨励賞
A02	村瀬 孔大	西宮湯川記念賞
A03	柳 哲文	原始ブラックホール形成理論第一人者
B01	道村 唯太	日本物理学会若手奨励賞
B02	高田 昌広	すばる国際研究チーム サイエンスワーキンググループ長
B03	宮崎 聡	日本天文学会林忠四郎賞、文部科学大臣表彰科学技術賞
B04	山崎 典子	XRISM衛星の中心的研究者
B05	西田 昌平	Belle国際実験グループ物理コーディネータ
B06	小松 英一郎	日本天文学会林忠四郎賞、西宮湯川記念賞、Breakthrough Prize
C01	山崎 雅人	素粒子メダル奨励賞
C02	安藤 真一郎	オランダ科学研究機構Vidi賞



強力なチーム



# B01班: レーザー干渉計班

大型のレーザー干渉計型重力波望遠鏡KAGRAに偏光板を  
テーブルトップサイズの光リング共振器

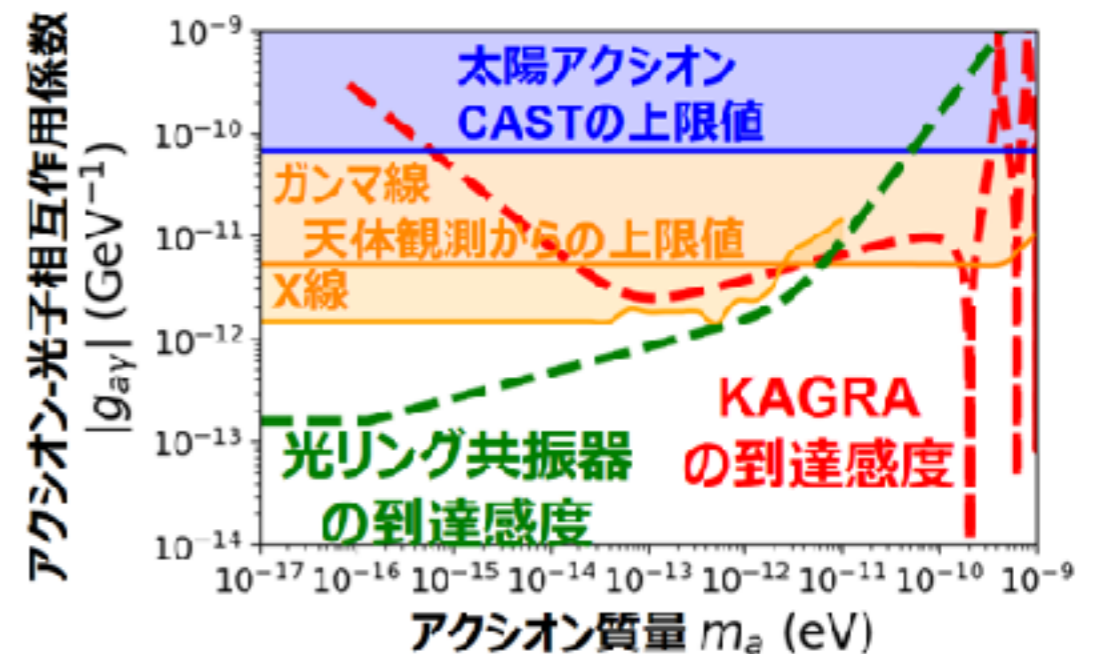


広帯域  
アクシオン探索

PRL 121, 161301 (2018)

狭帯域  
アクシオン探索

PRL 123, 111301 (2019)

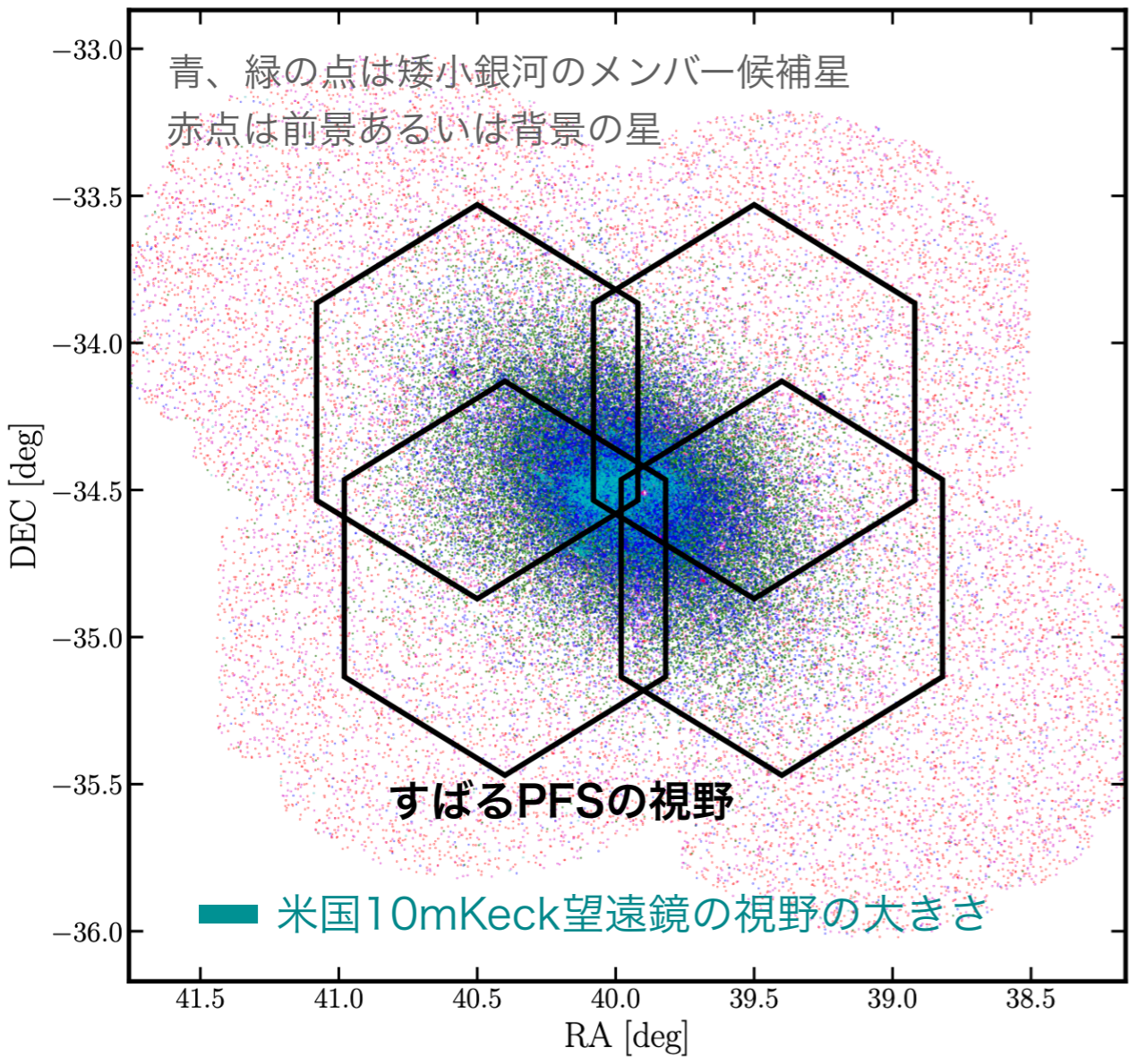


$10^{-11}$  eV程度以下の超軽量ダークマターを  
独自手法により世界最高精度で探索  
日本発のアイディア



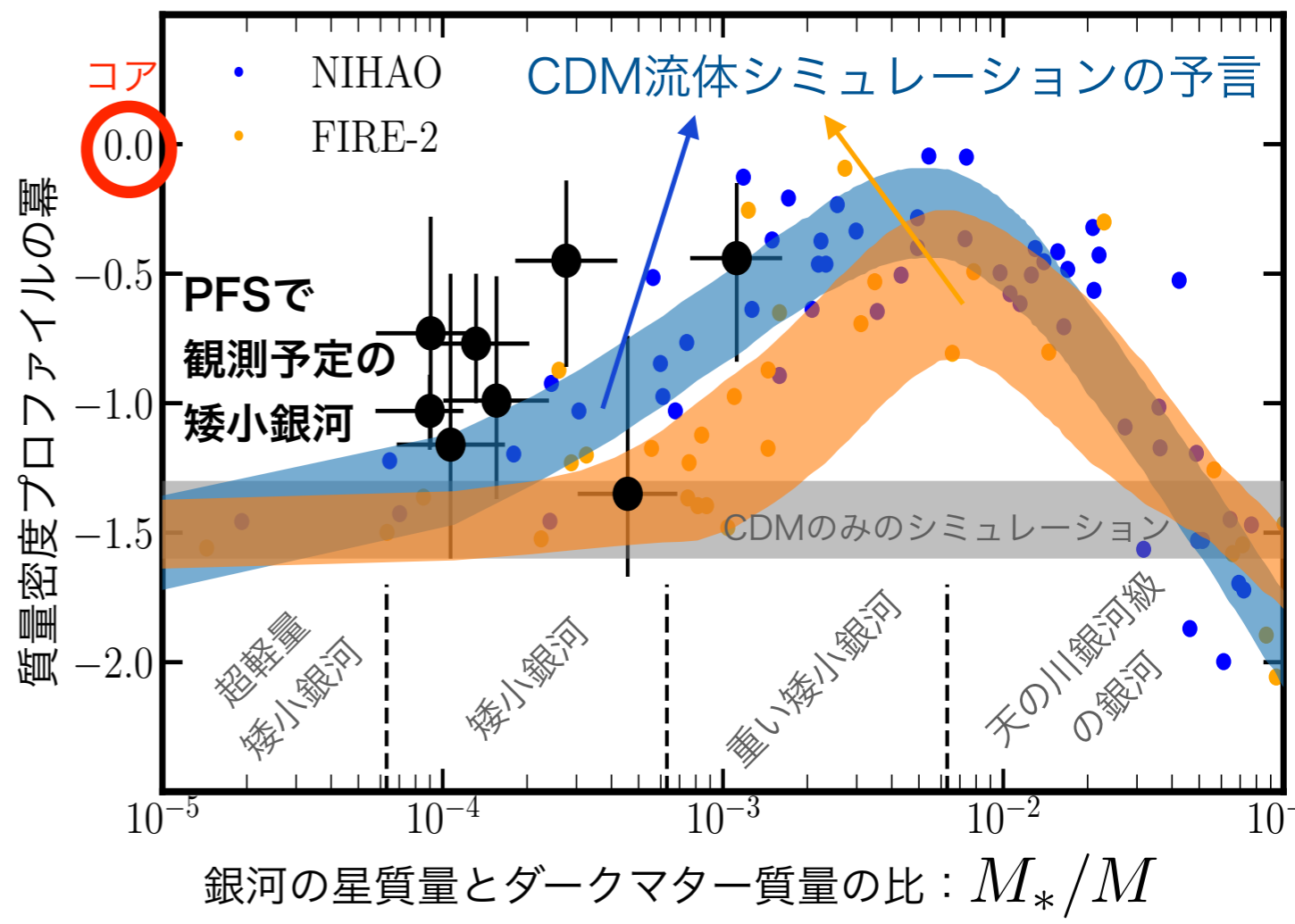
# B02班: すばるPFSで探るダークマター

ダークマターが卓越する矮小銀河Fornaxの領域



すばるPFSの1晩のデータで  
米国Keck望遠鏡60晩に相当

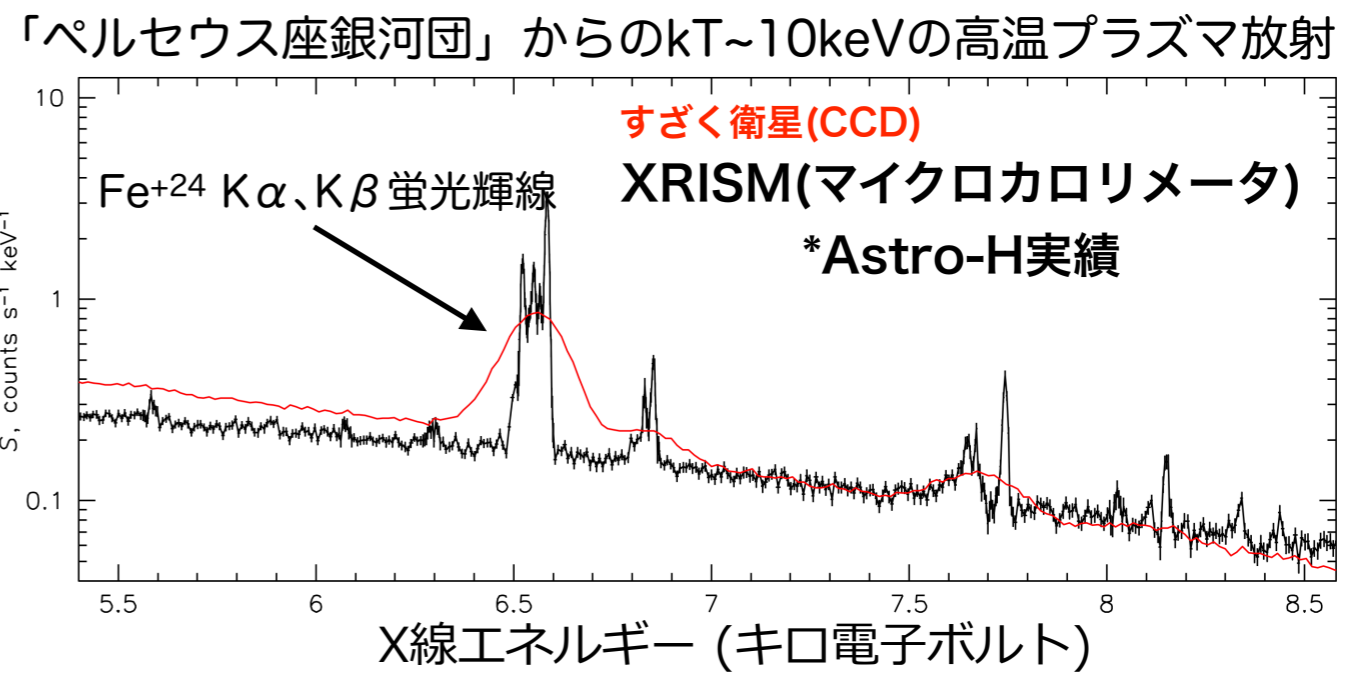
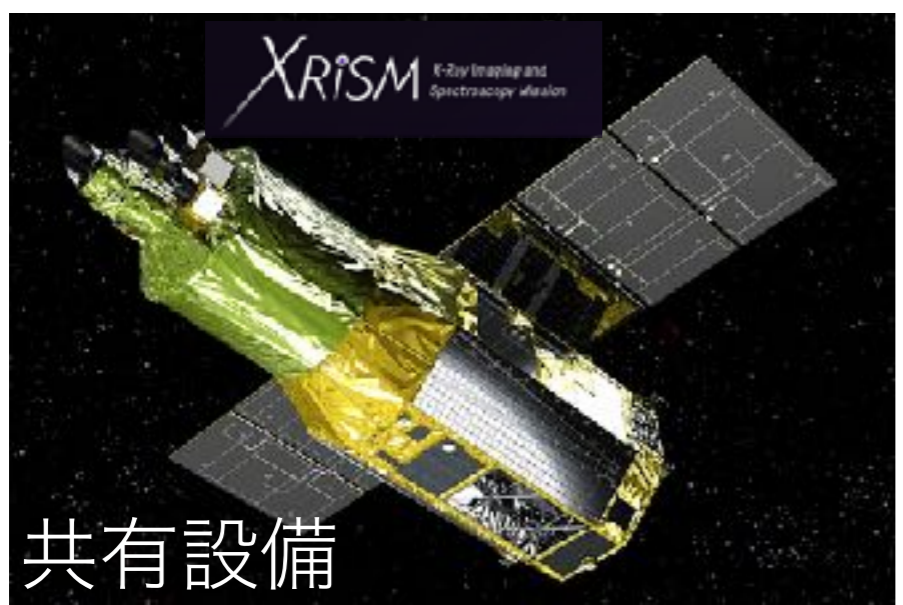
矮小銀河の質量プロファイルからダークマターの性質を探る (現在の観測は不定性が大きい)



大きさを持つダークマターの  
村山の理論の検証

Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 2, 021301

# B04班: X線領域の観測技術の革新によるダークマター探索



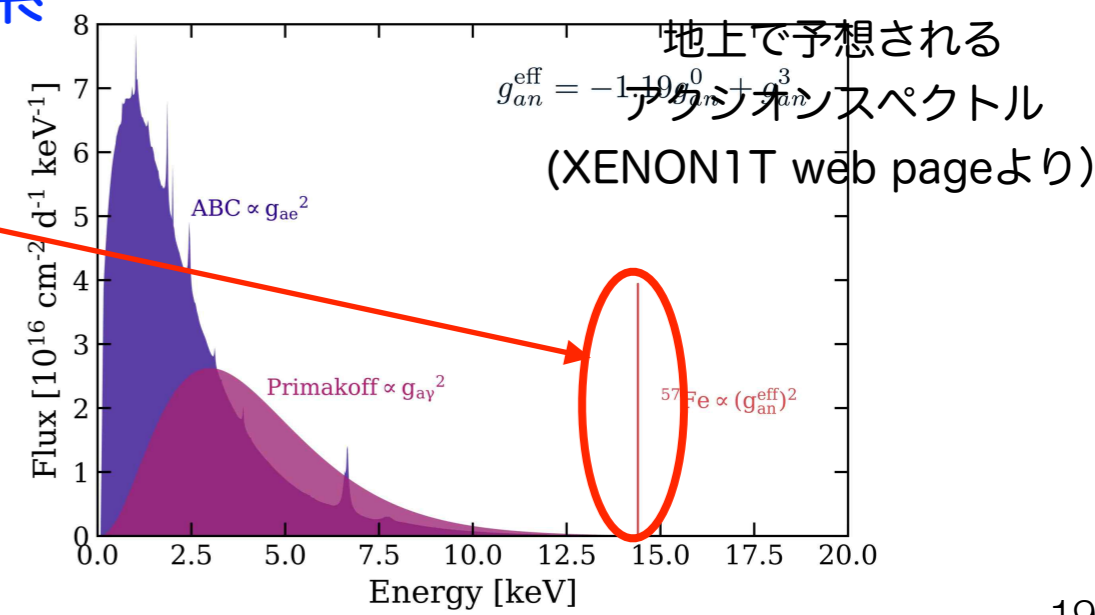
XRISM 2022年打ち上げ予定

分光分解能は既存のCCDの20倍、宇宙のX線による観測技術に革新

keV質量範囲のダークマターの崩壊輝線を直接捉える

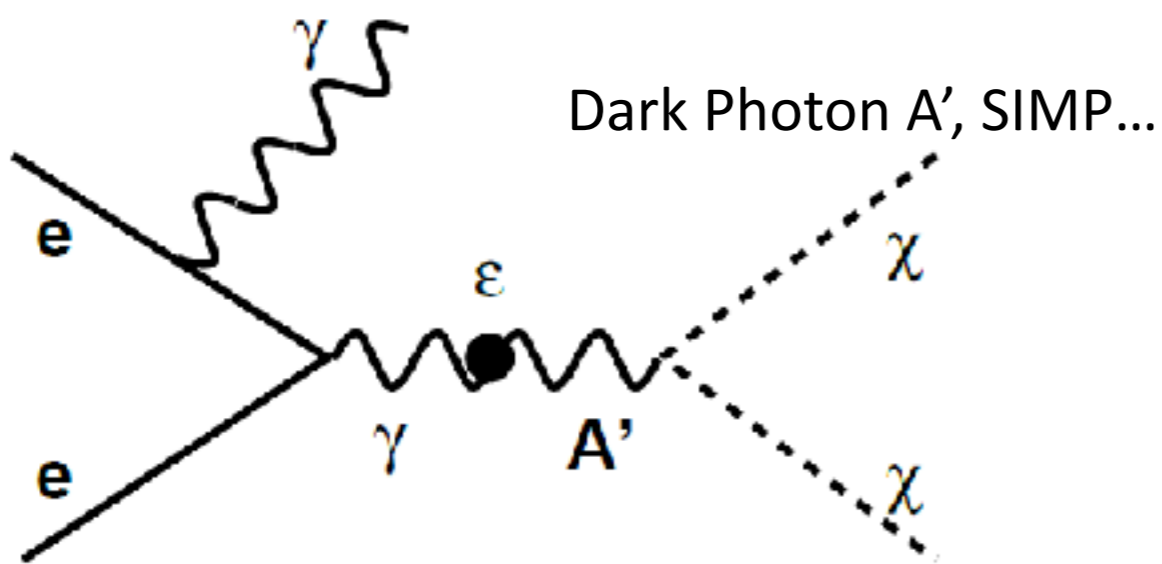
この革新的「マイクロカロリメータ」により、太陽アクシオン直接探査。

太陽アクシオンに特徴的な14keVのX線を探索



# B05班: 電子陽電子加速器によるダークマター探索

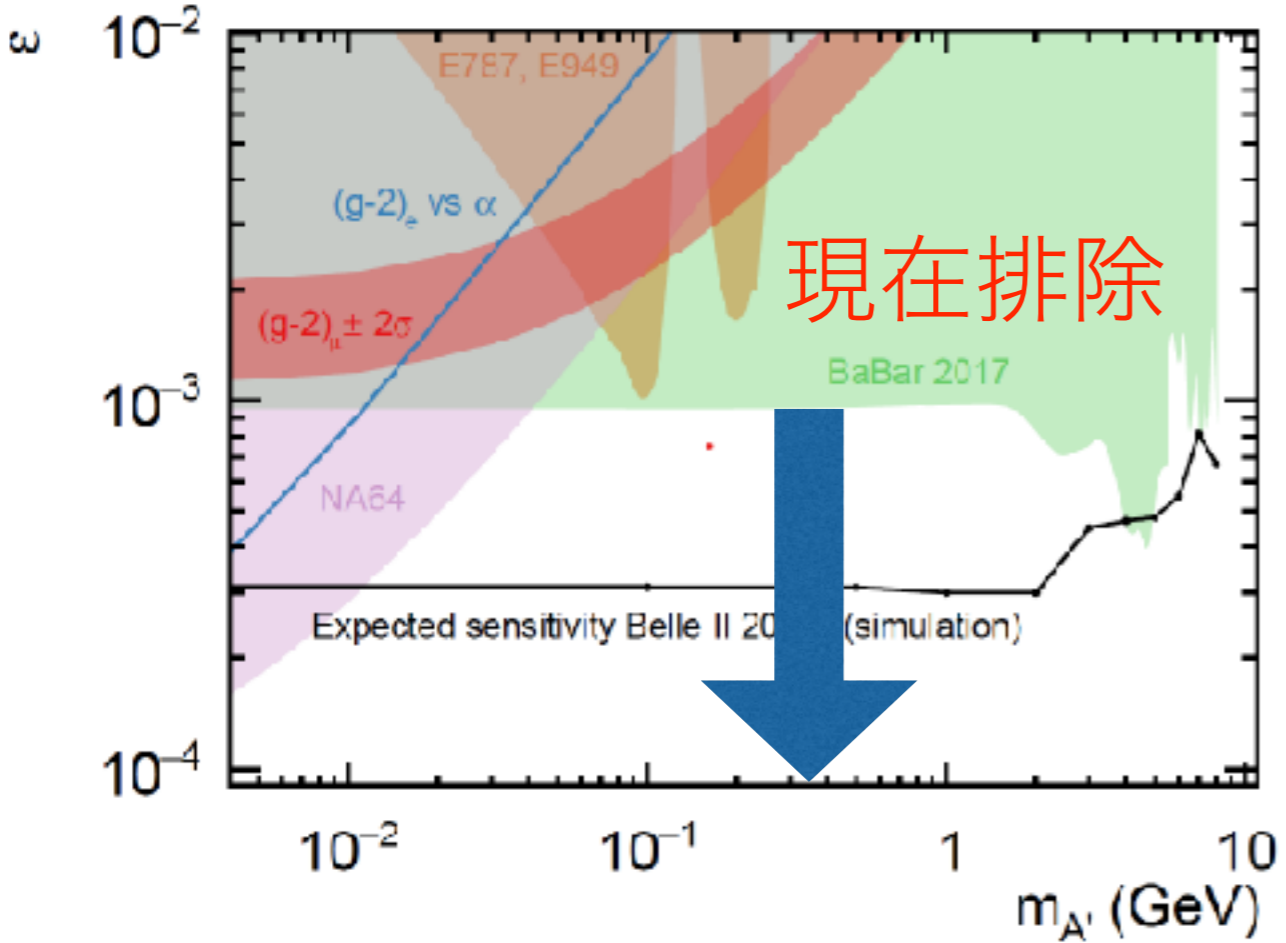
$e^+e^- \rightarrow \gamma + \text{見えないもの}$



- 終状態は光子1つだけ。
- 「単光子トリガー」が必要  
→ 本研究で開発・実装
- 過去の測定は少ない  
→ 本研究で解析

0.1~10 GeV の領域で  
従来の10倍の感度で  
ダークマターを探索

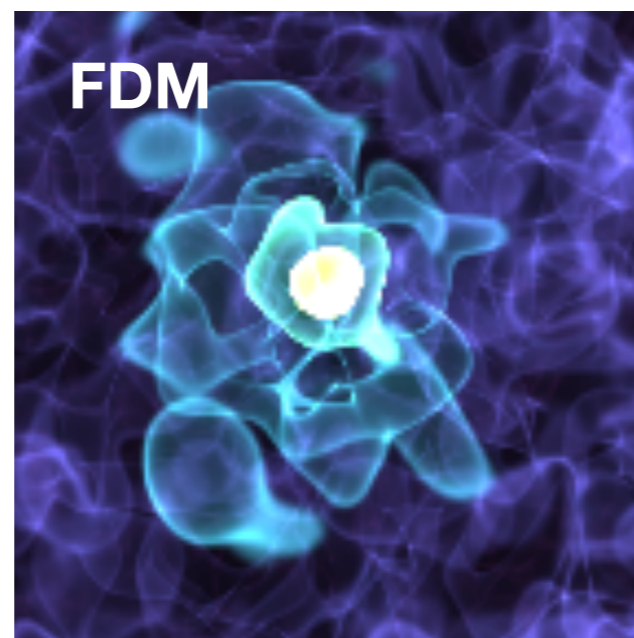
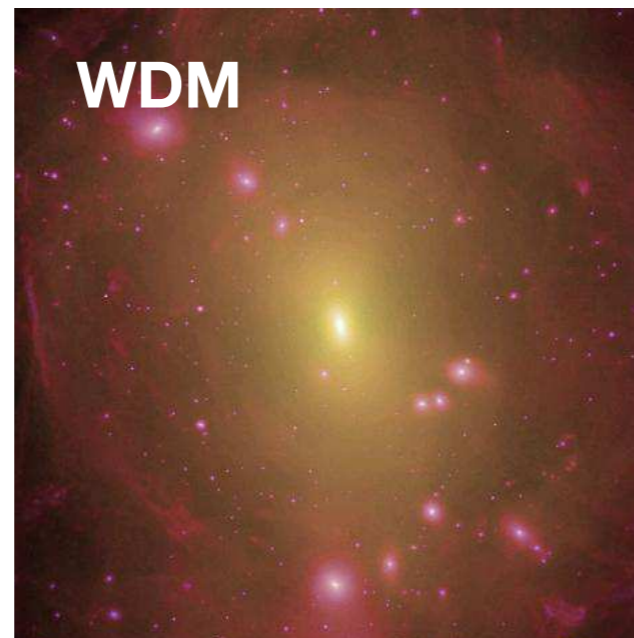
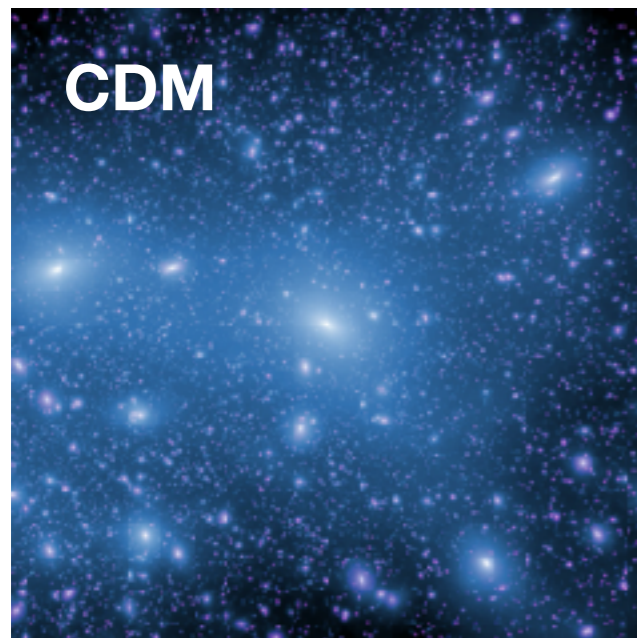
SuperKEKB  
加速器



共有設備

# C02班：宇宙構造形成理論から迫るダークマター

**目指すサイエンス**：銀河内スケールの構造形成を記述するモデルを構築し、さまざまなダークマター候補に適用



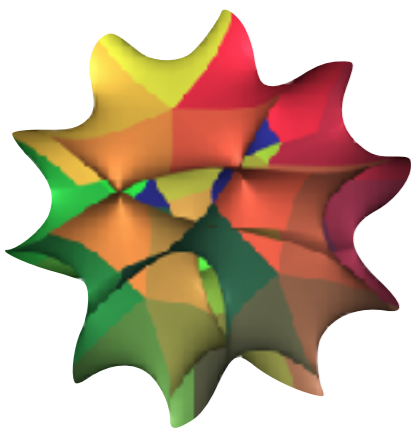
数値シミュレーションによる、様々なダークマター候補の場合における小スケール密度分布



Jim Peebles  
2019年ノーベル物理学賞  
構造形成理論

- ダークマター粒子の性質によって、銀河内スケールにおける分布はかなり違う
- **ダークマターの正体同定**への鍵となりうる

# 量子重力としての超弦理論：究極の統一理論



どんな宇宙が実現されるか？

どんな力？

どんなポテンシャル？

どんな物質？

どんな対称性？

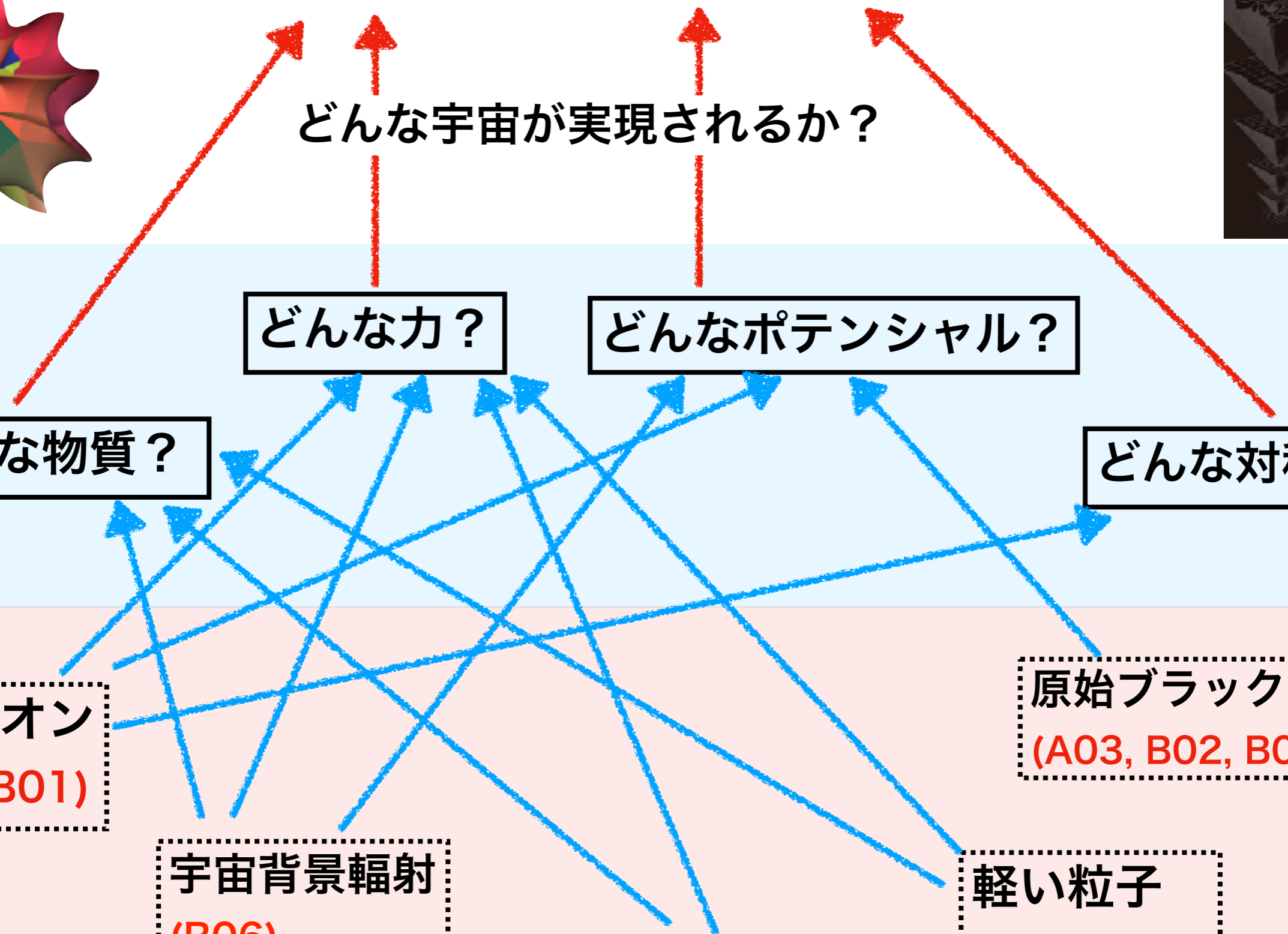
アクシオン  
(A01, B01)

原始ブラックホール  
(A03, B02, B03)

宇宙背景輻射  
(B06)

重い粒子  
(A02)

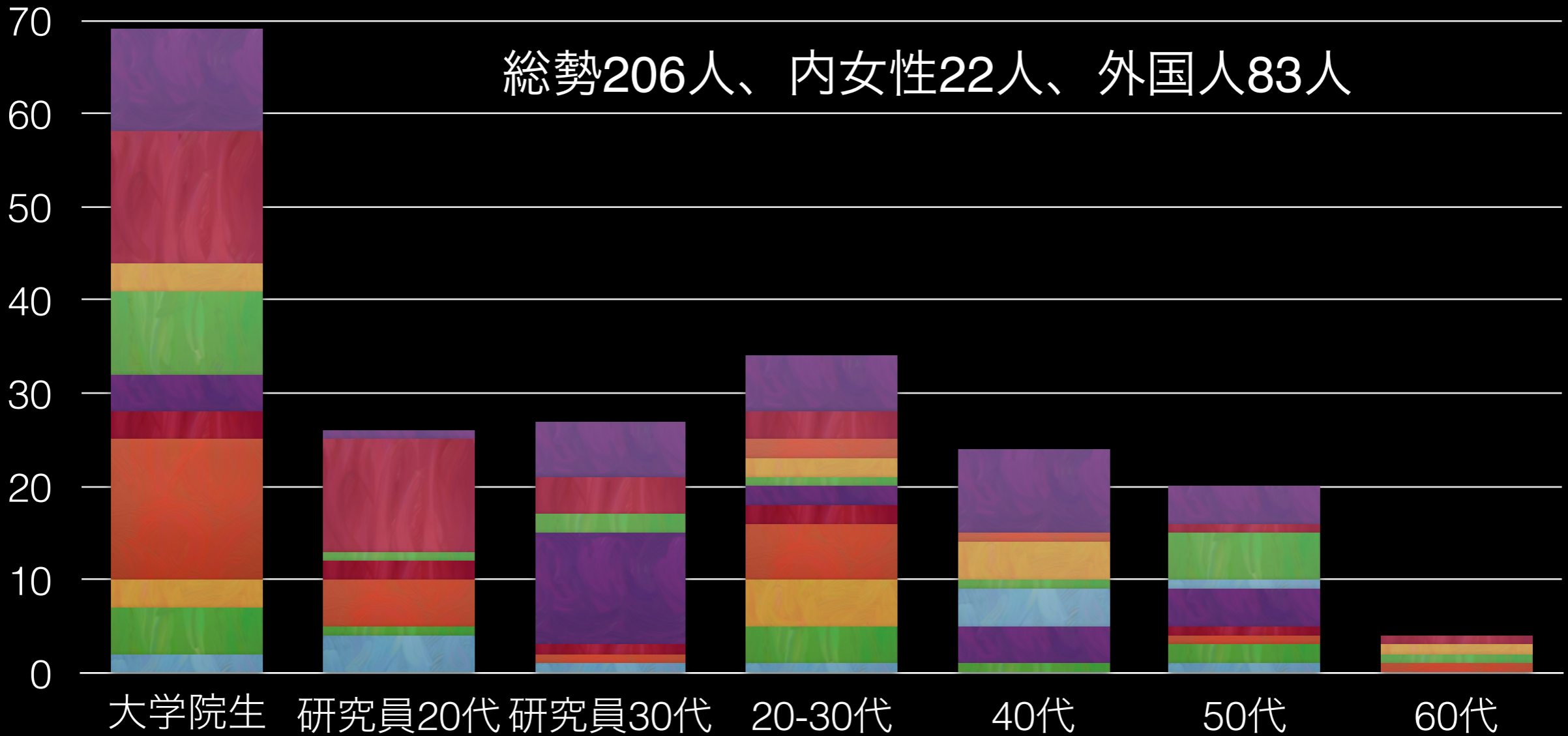
軽い粒子  
(B04, B05)



# 本領域で期待される成果

アプローチ	施設	サイエンス	新しいデータ
レーザー干渉計	KAGRA	アクシオン	グループの承認次第
レーザー干渉計	テーブルトップ	アクシオン	期間内
レーザー干渉計	KAGRA	$B-L$ ゲージボソン	期間内
分光観測	すばる	自己相互作用	期間内
分光観測	すばる	ファジーダークマター	期間内
分光観測	すばる	矮小銀河中の DM 対消滅	期間内
イメージング	すばる	DM 3次元地図	期間内
イメージング	すばる	矮小銀河の個数, 空間分布	期間内
イメージング	すばる	原始ブラックホール	期間内
X線観測	XRISM	ステライルニュートリノ	期間内
X線観測	XRISM	弦理論モデュライ	期間内
X線観測	テーブルトップ	アクシオン	期間内
$e^+e^-$ 加速器	SuperKEKB	ダークフォトン	期間内
$e^+e^-$ 加速器	SuperKEKB	SIMP	期間内
$e^+e^-$ 加速器	ILC	余剰次元	将来計画
CMB	ACT/SPT/SA	アクシオン	期間内
CMB	ACT/SPT/SA	晴れ上がり時期の対消滅	期間内

# 年齢分布



大学院生、20 - 30代の研究者が本領域研究を牽引する

更に若手研究者を雇用

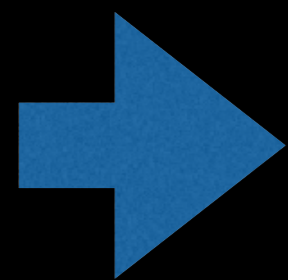
キャリア研修、外国機関と人材交流で将来を確保



# 公募研究



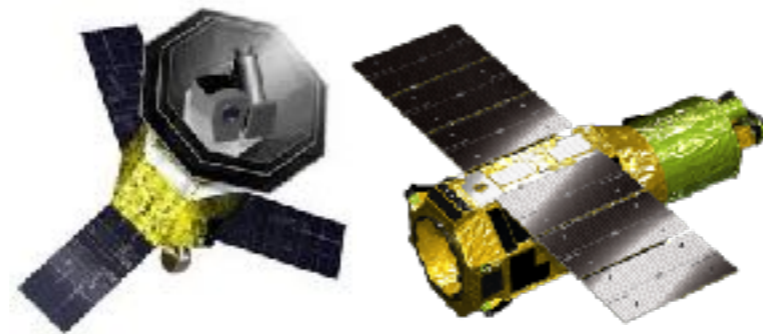
- 公募研究への期待：
- 新しい分野、アイデアが必要
  - 今までに考えられなかったダークマターの理論
  - 今までなかった実験、観測の手法
- 天文学、量子光学、量子デバイス、素粒子物理、重力など、分野を横断する研究を奨励



今までにない**分野を横断する**コミュニティ

更にアウトリーチで日本社会・世界に還元

space



**理論班**  
 軽いDM  
 重いDM  
 巨視的DM

**実験班**  
 レーザー干渉計  
 すばる分光  
 イメージング  
 X線, 加速器  
 CMB

**究極班**  
 量子重力  
 宇宙構造形成理論

Logos on the map include: UCL, Max-Planck-Institut für Astrophysik, SRON, University of Amsterdam, YITP, Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology (KAVL IPMU), JAXA, ICRR, University of Tokyo, Keio University, Waseda University, Osaka University, Kansai University, OCU, NAOJ, Berkeley, PI, NASA JPL, and many others.

日本の地方大学から世界の一流研究機関まで

# 提案のポイント：ダークマターは**存在**するが、**未知の物質**

今までの探索は**ごくわずかな質量範囲**に集中

ニュートリノ 電子陽子 細菌 蚊 人間 富士山 地球 太陽

ダークマターの質量 [GeV/c<sup>2</sup>]

10<sup>-40</sup> 10<sup>-30</sup> 10<sup>-20</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>10</sup> 10<sup>20</sup> 10<sup>30</sup> 10<sup>40</sup> 10<sup>50</sup> 10<sup>60</sup> 10<sup>70</sup>



今まで理論的な偏見に囚われて見てこなかった

**ディスカバリースペース**にアタック

日本発で世界の**ダークマター研究を变革**

既存分野の壁を破る**横断的研究**

**既存設備を**本来の目的とは異なる形で**有効活用**し、**世界をリード**