

2010年代の日本の天体宇宙物理大型計画



天体宇宙物理分野(5計画)

大型低温**重力波**望遠鏡(LCGT)

30m**光赤外**望遠鏡(TMT)

一平方キロメートル**電波**干渉計(SKA)

次世代**赤外線**天文衛星(SPICA)

宇宙**X線**衛星アストロ-H(ASTRO-H)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2011年1月31日13:30-14:20@日本学会議講堂

日本学会議シンポジウム

学術の大型施設計画・大規模研究計画

(マスタープラン)に関する物理系シンポジウム

天文学・宇宙物理学研究の 現状と展望

天文学・宇宙物理学研究対象と方法論： とにかく「いろいろ」

■ 対象別：「XX」の起源と進化

- 「XX」 = 惑星、太陽、恒星、星間物質、超新星、コンパクト天体、銀河系(天の川)、銀河、活動銀河核、銀河団、宇宙、時空、生命・文明

■ 波長別：「YY」天文学

- 「YY」 = 電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線、宇宙線、ニュートリノ、重力波

■ 手法別：

- 理論、観測(地上、気球、ロケット、衛星、地下)、実験、数値シミュレーション

最近20年間の観測的進展

- ダークマターの存在の確立
- 超新星1987Aからのニュートリノの検出
 - ニュートリノ天文学
- 太陽系外惑星の発見
- ガンマ線バーストの宇宙論的天体説の確定
- 超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見
 - ダークエネルギーの存在／一般相対論の限界？
- 広域銀河3次元地図作成と遠方銀河の地平線拡大
 - スローンサーベイ、ハッブル望遠鏡、すばる望遠鏡
- 宇宙マイクロ波背景輻射による精密宇宙論
 - 標準ダークマターモデル(インフレーションによるゆらぎ、冷たいダークマター、ダークエネルギー)

残された課題と謎

- **宇宙の起源**
 - 素粒子物理学・量子重力理論の進展に依存
- **ダークマターの直接検出**
 - 天文学から高エネルギー物理学実験へ
- **ダークエネルギーの性質の解明**
 - 宇宙の加速膨張の起源
- **重力波の直接検出**
 - 一般相対論の検証から新しい天文学の窓へ
- **高エネルギー宇宙線の起源**
 - 粒子加速機構の解明、粒子線天文学の開拓
- **超新星爆発・ガンマ線バーストのメカニズム**
 - 大質量星進化の最終段階の理解
- **第一世代天体の発見・起源・進化**
 - 宇宙の果てを見通す、天体の起源、元素の起源
- **恒星・惑星の起源**
 - 星・惑星・コンパクト天体の形成と進化
- **地球型系外惑星の発見から宇宙生物学へ**
 - 第二の地球、生命・文明の起源、生物の普遍性

大型科学計画における2つの相補的文化： 天文学と高エネルギー物理学の例

	高エネルギー物理学	天文学
研究ゴール	明確、一点集中 定量的な予言の検証	とりあえず何でもあり 検証よりむしろ予想外の発見
データ	共同研究グループ内 で占有、単一目的	1, 2年後には公開(誰でも自由 に応用・解析可)、多目的
規模	国際協力は当たり前 数千人規模のものも	十人から百人程度が普通 今後は巨大化が不可避
個々の成果 のインパクト	大	小(?)
全成果総和 のインパクト	大 (というか上の値 とほぼ同じ)	大 (とりわけ専門家以外の一 般納税者に対しては特大)

(天文学) 研究スタイルの必然的進化:

太陽系外惑星探査を例として

今はどの時期なのかを見極めることが本質

**ブレイク
スルー**

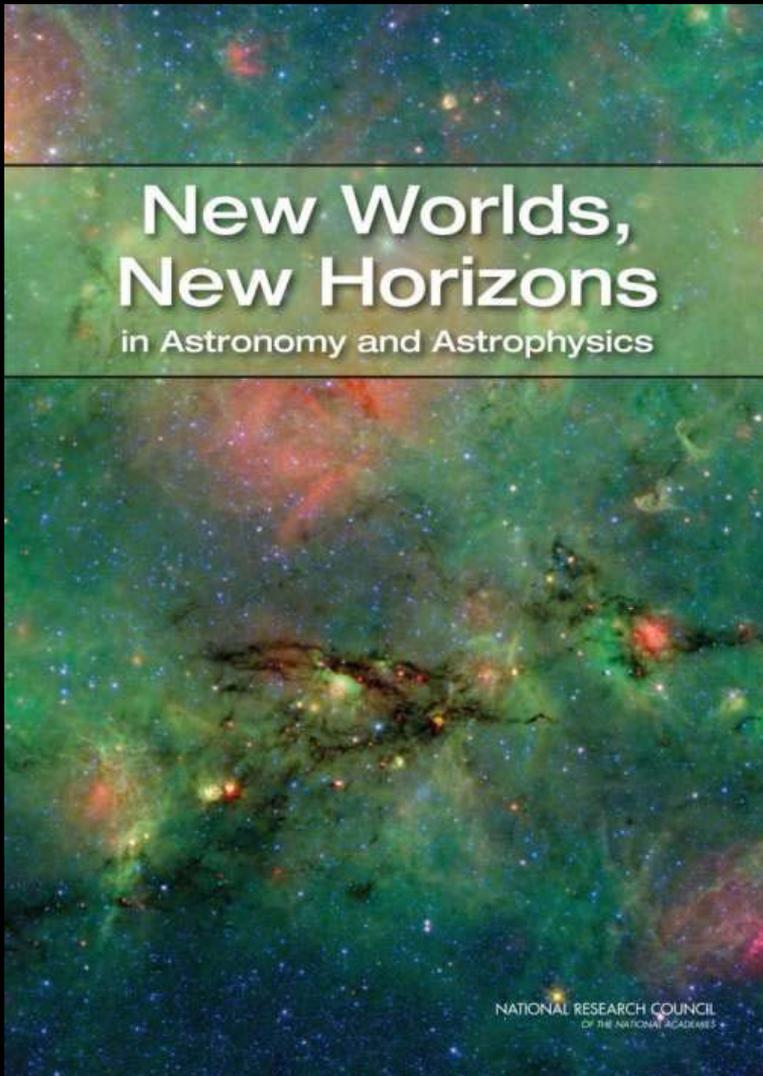
1995年
系外惑星発見

2009年
系外惑星専用
衛星Kepler
打ち上げ

20XX年
ハビタブル惑星
発見???

	地上からの系外惑星探査	スペースからの系外惑星探査	系外惑星上の生命探査
紀元前 ~1995年	山師、先駆者 ハイリスク ・ノーリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン	論外: 危ない人々、十分 成功して失うもの がない人
1995年 ~2009年	ゴールドラッシュ ハイリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン
2009年 ~ 20xx年	定着 ローリスク ・ハイリターン	実現 ローリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン
20xx年~	統計を稼ぐ ローリスク ・ローリターン	定着 ローリスク ・ローリターン	実現? ローリスク ・ハイリターン?

Astro2010: decadal survey



- *Cosmic Dawn*
- *New Worlds*
- *Physics of the Universe*

August 13, 2010

http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

The Science Frontier: **discovery areas** and principal questions (1)

■ **Discovery areas**

- Identification and characterization of nearby habitable exoplanets 第二の地球
- Gravitational wave astronomy 重力波天文学
- Time-domain astronomy 突発・激変天体
近地球接近天体
- Astrometry 銀河系・宇宙の精密測量
- The epoch of reionization 宇宙の再電離

The Science Frontier:

discovery areas and principal questions (2)

■ Questions:

- How did the universe begin?
- What were the first objects to light up the universe and when did they do it?
- How do cosmic structures form and evolve?
- What are the connections between dark and luminous matter?
- What is the fossil record of galaxy assembly and evolution from the first stars to the present?
- How do stars and black holes form?
- How do circumstellar disks evolve and form planetary systems?
- How do baryons cycle in and out of galaxies and what do they do while they are there?
- What are the flows of matter and energy in the circumgalactic medium?

The Science Frontier:

discovery areas and principal questions (3)

■ **Questions:**

- What controls the mass-energy-chemical cycles within galaxies?
- How do black holes work and influence their surroundings?
- How do rotation and magnetic fields affect stars?
- How do massive stars end their lives?
- What are the progenitors of Type Ia supernovae and how do they explode?
- How diverse are planetary systems and can we identify the telltale signs of life on an exoplanet?
- Why is the universe accelerating?
- What is dark matter?
- What are the properties of the neutrinos?
- What controls the masses, spins and radii of compact stellar remnants?

Large-scale Programs (prioritized)

■ Ground-based

- 1. Large Synoptic Survey Telescope (LSST) Subaru HST
- 2. Mid-Scale Innovations Program Subaru PFS
- 3. Giant Segmented Mirror Telescope (GSMT) TMT
- 4. Atmospheric Cerenkov Telescope Array (ACTA)

■ Space

- 1. Wide Field InfraRed Survey Telescope (WFIRST) CTA
WISH
- 2. Explorer Program Augmentation ASTRO-H
- 3. Laser Interferometer Space Antenna (LISA)
- 4. International X-ray Observatory (IXO) DECIGO

天体宇宙物理学関連の大型5計画:

大型低温**重力波**望遠鏡(LCGT) 地上

30m**光赤外**望遠鏡(TMT) 地上

1平方キロメートル**電波**干渉計(SKA) 地上

次世代**赤外線**天文衛星(SPICA) 衛星

宇宙**X線**衛星アストロ-H(ASTRO-H) 衛星

以下のプレゼンテーション作成のために、これら5計画の関係者の方々から多くの資料を提供して頂いた。お名前を記すことはしないが、ここに厚く感謝の意を表わせて頂きたい。

天体宇宙物理学関連**地上**大型計画

- LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)
 - 大型低温重力波レーザー干渉計望遠鏡@神岡
 - 日本主導
- TMT (Thirty Meter Telescope)
 - 30メートル光・赤外望遠鏡@ハワイ島マウナケア山
 - 国際協力(米加中印台湾+日本)
- SKA (Square Kilometer Array)
 - 1平方キロメートル電波干渉計@豪?南アフリカ?
 - 国際協力(欧米加豪中印南アフリカ+日本)

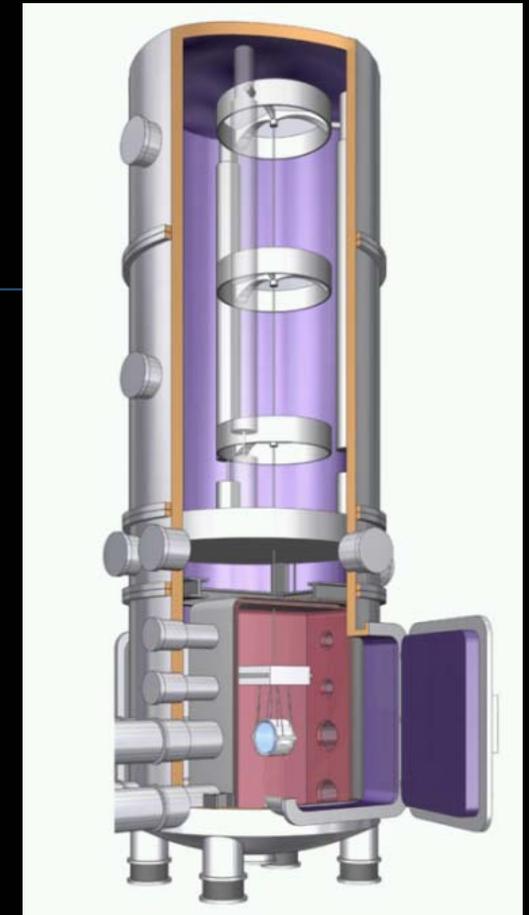
LCGT: 大型低温重力波望遠鏡

- 日本学術会議の提言が契機となり、文部科学省の「最先端研究基盤事業」の補助対象事業の1つに選定され、プロジェクトが開始された。既に研究推進体制を整備して、神岡地下に建設中
- **重力波天文学の創生**
 - 基礎物理学: 世界初の重力波直接検出
 - 天文学: 宇宙観測の全く新しい窓
 - 一般相対論検証
 - 初期宇宙、ブラックホール、中性子星の解明
- **日本独自の計画とその優位性**
 - 東大宇宙線研がホスト、国立天文台、KEKと協力
 - 予算155億円
 - 地面振動が圧倒的に小さい神岡地下に建設

LCGT: 装置の概要

片側3kmの超高感度レーザー干渉計

LCGT用低温鏡
と懸架システム



- 地面振動の小さい神岡で200m以深の地下に設置
 - 本格的なレーザー干渉計として世界初
- 熱雑音を抑制して極限感度を達成するため、極低温鏡の採用
 - 世界で唯一
- 7億光年先の連星中性子星合体を観測できる感度
 - 年に数回以上の事象観測が期待

LCGT: 年次計画と国際競争力

- 2013-14年: 常温で調整・初期観測 → 引き続き高度化(低温化)
 - 重力波世界初観測を狙う最高感度の装置へ
- 2017年度当初から低温で定常観測状態になるよう最大限の努力
 - 高度化(低温化)に向けた予算獲得には今後の努力が必要
- 欧米でも2010年代半ば以降の重力波初観測に向けたプロジェクトが進行
 - 国際競争力を保つには、まさに今とりかかるしかない

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
LCGT				建設	調整・初期観測	調整	調整	調整	観測	観測	観測
(次期) LIGO (米)	調整・観測	調整・観測	調整・観測	改造(承認済み)	改造(承認済み)	改造(承認済み)	調整	調整	観測	観測	観測
(次期) Virgo (欧)	調整・観測	調整・観測	調整・観測	改造(承認済み)	改造(承認済み)	改造(承認済み)	調整	調整	観測	観測	観測

LCGT: 国際重力波天文学ネットワークへ

- 米欧の2局に加えて日本にLCGTが存在する意義
 - 重力波源の方向決定
 - 24時間の全天重力波モニターネットワーク観測が実現
- 他波長・他粒子観測と組み合わせて重力波天文学を創生
 - ニュートリノ、ガンマ線との同時観測
 - 光学望遠鏡によるフォローアップ観測
- 国際共同研究の推進
 - LIGO, Virgoとの実質的な共同研究開始
 - アジアの観測センターを目指す
 - 中国、台湾、インド、アメリカとの共同研究
 - 韓国とも協議中
 - 更なる国際共同研究の拡大の検討

ブラックホール
誕生



次期VIRGO

次期LIGO

LCGT



天体宇宙物理学関連地上大型計画

- LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)
 - 大型低温重力波レーザー干渉計@神岡
 - 日本主導
- TMT (Thirty Meter Telescope)
 - 30メートル光・赤外望遠鏡@ハワイ島マウナケア山
 - 国際協力(米加中印台湾+日本)
- SKA (Square Kilometer Array)
 - 1平方キロメートル電波干渉計@豪?南アフリカ?
 - 国際協力(欧米加豪中印南アフリカ+日本)

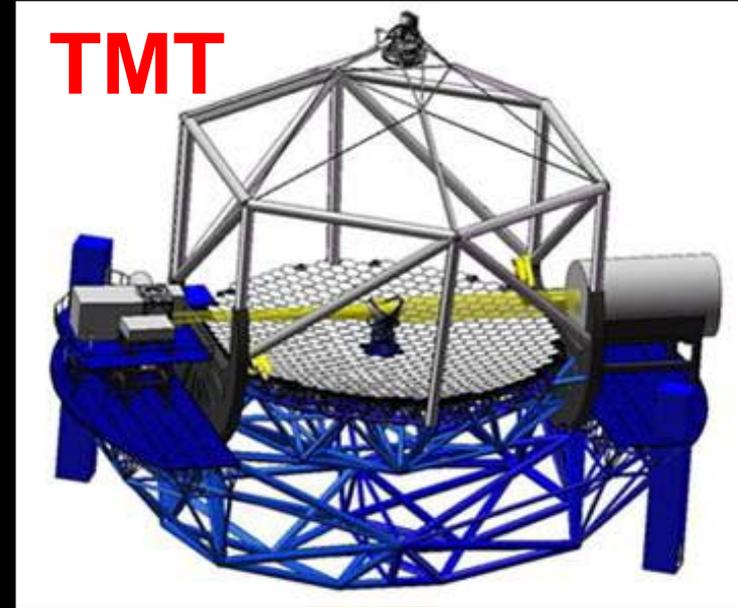
TMT: 概略

- 口径30mの次世代光赤外大型望遠鏡
 - 1.5m六角鏡492枚
 - ハワイ島マウナケア山
- 広範な次世代天文学研究テーマを網羅
 - 第一世代天体、銀河の誕生と進化、太陽系外惑星の精密分光と生命の兆候の探査、宇宙膨張変化率の直接検出、物理定数の時間変化
- 国際協力体制
 - 建設費約1300億円（日本が1/4分担??）
 - 2019年末完成
 - カリフォルニア大学、カルテク、米国天文学大学連合、カナダ天文学大学連合、中国、インド、台湾？



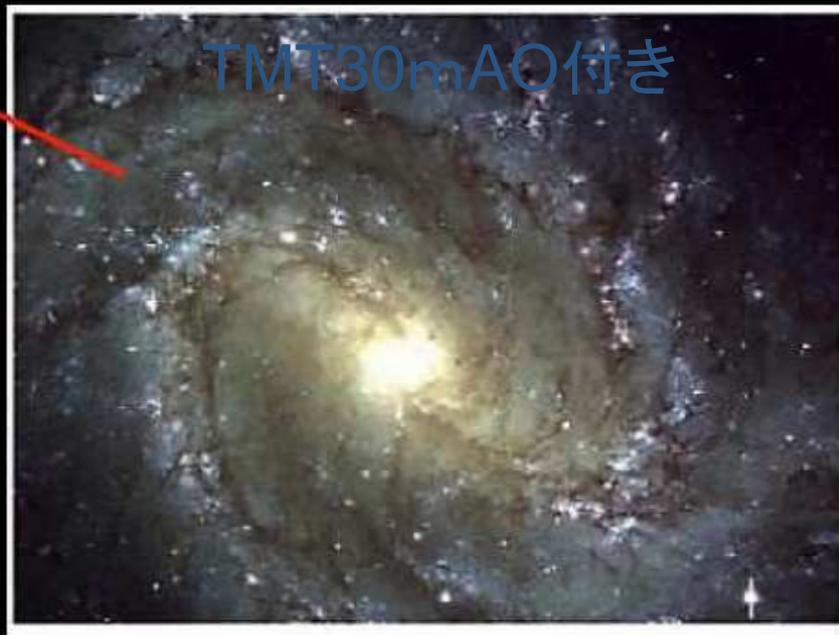
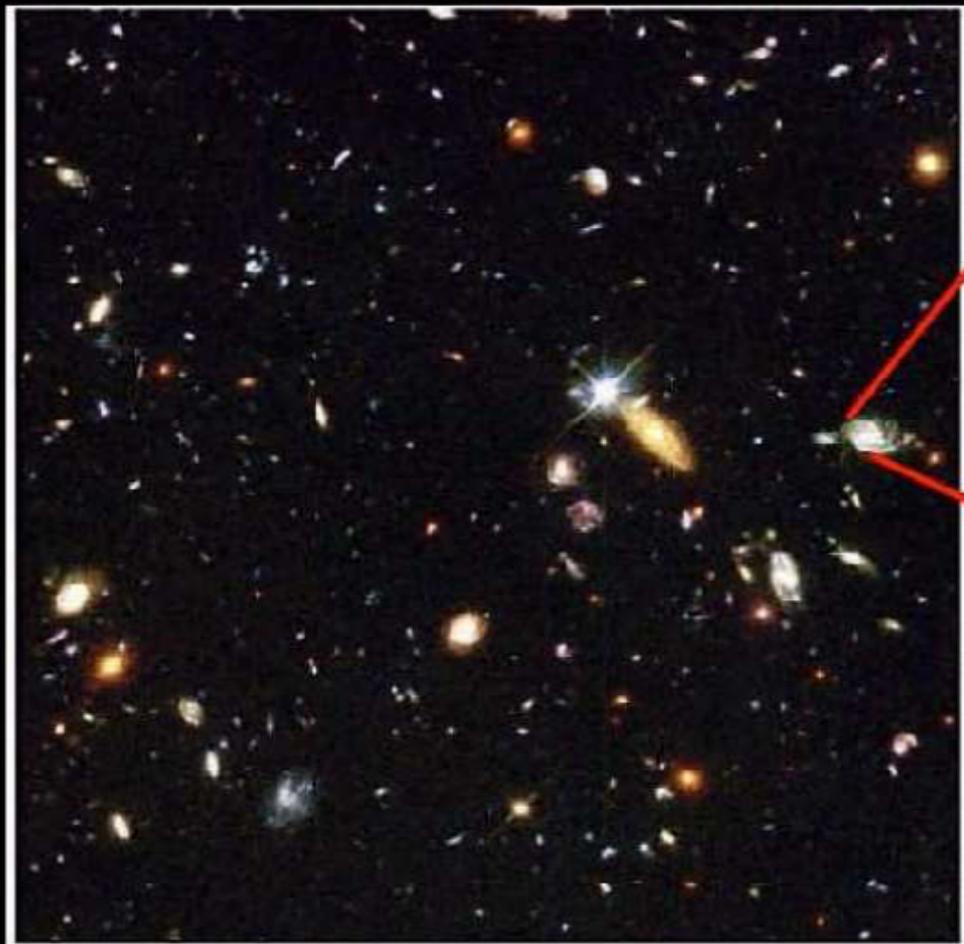
TMT: すばるとの比較・相補性

	TMT	すばる
鏡直径	30m	8m
重量	1400トン	555トン
解像度	0.015秒角 @近赤外線	0.06秒角 @近赤外線
視野 (口径)	7分 (MOBIE)	1.5度 (HSC)



- すばるで発見・TMTで精査
 - すばるの広視野とTMTの高解像度・高感度は次世代天文学の最強ペア
 - 日本の優位性(サイト、過去の成果、すばるとのシナジー)を最大限発揮

TMTの威力： 大集光力と高解像度



解像度 ずばるの3.7倍に
集光力 ずばるの13倍に

The same with a 30 meter telescope
& Adaptive Optics

TMT: 期待される科学的成果

- 宇宙最遠方銀河と第一世代天体
 - 日本がすばるで主導しているテーマ
- 宇宙の膨張率の直接測定
 - ダークエネルギーの直接的検証
- 物理基本定数は時間変化するか？
 - 物理学の大前提を直接検証
- 太陽系外惑星の直接撮像・分光とバイオマーカー探査
 - 天文学から宇宙生物学へ
- むろんこれら以外にも高解像度・高感度で従来のあらゆる天文学観測を飛躍的に進歩させる

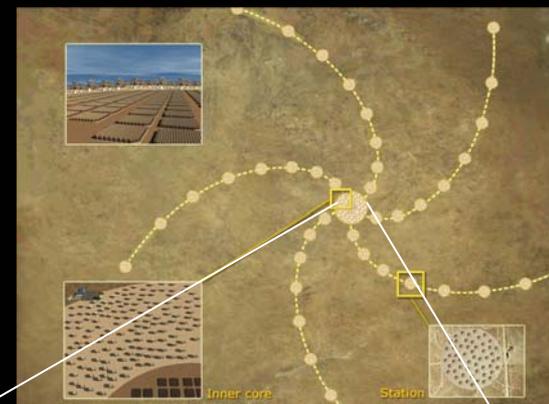
天体宇宙物理学関連**地上**大型計画

- LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)
 - 大型低温重力波レーザー干渉計望遠鏡@神岡
 - 日本主導
- TMT (Thirty Meter Telescope)
 - 30メートル光・赤外望遠鏡@ハワイ島マウナケア山
 - 国際協力(米加中印台湾+日本)
- SKA (Square Kilometer Array)
 - 1平方キロメートル電波干渉計@豪?南アフリカ?
 - 国際協力(欧米加豪中印南アフリカ+日本)

SKA: 1平方キロメートル電波干渉計

■ 集光面積1km²の巨大電波干渉計

- 豪 あるいは 南アフリカに建設
- 波長1.2 cm ~ 3mの長波長電波
- アンテナ2000台を3000km範囲内に
- 高角度分解能: 0.01 – 0.001 秒角
- アルマ(波長0.3mm – 10 mm、0.01 秒角)と相補的



■ 米欧豪中心の国際協力

- 2014年頃に建設開始?
- 2018年頃から初期運用?
- 2024年頃から本格運用?
- 1000億円を超える総経費



Big Bang

SKA: 科学的目標

Time →

10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-32} s	10^{-10} s	300 s	3×10^5 yr	1×10^9 yr	15×10^9 yr
Superstring(?) Era	GUT Era	Inflation Era	Electro-weak Era	Particle Era	Recombination Era	Galaxy and Star Formation	Present Era

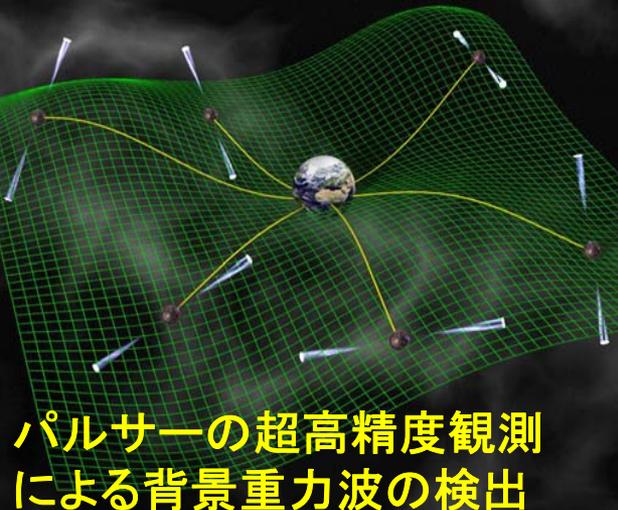
重力理論の検証
重力波検出



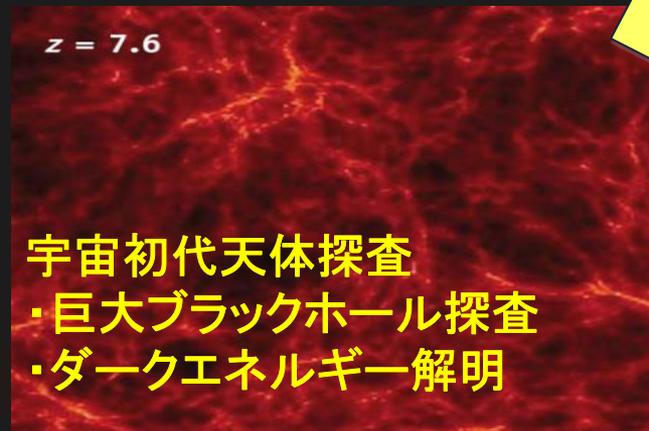
宇宙暗黒時代・
銀河進化の解明



宇宙における
生命探求



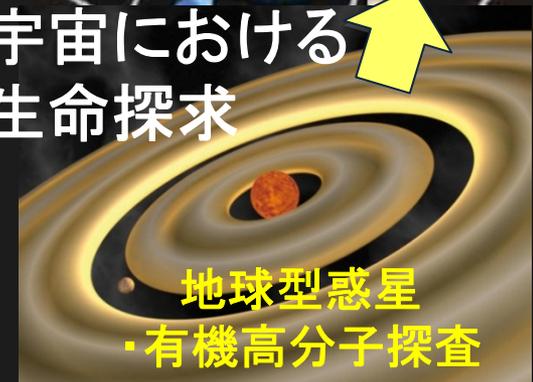
パルサーの超高精度観測
による背景重力波の検出



$z = 7.6$

宇宙初代天体探査

- ・巨大ブラックホール探査
- ・ダークエネルギー解明



地球型惑星

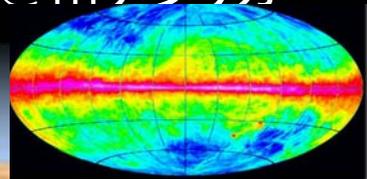
- ・有機高分子探査

SKAパスファインダー

- SKAをスケールダウンした装置 (集光力1%)
 - 新技術の実証と(試験的な)サイエンス実施
- 進行中の3つのパスファインダー
 - **ASKAP (Australia SKA Pathfinder)**
 - 12mパラボラアンテナ36台@豪州
 - 0.7 GHz-1.8 GHzのアレイ(200素子)受信機を搭載しHI広視野観測
 - **LOFAR (LOW Frequency Array for Radio Astronomy)**
 - 無指向性アンテナ5万台@欧州
 - < 250 MHzで赤方偏移HIイメージ取得
 - **MeerKat (Karoo Array Telescope)**
 - 12mアンテナを87台@南アフリカ



ASKAP



LOFAR

SKA: 日本の最近の進捗

1. SKA科学技術委員会への正式参加予定

- 日本代表を送り協議に参加
- 各国との協議により参加形態の模索
- サイエンスWG, 技術WGへの委員派遣

2. SKAによるサイエンス等の独自の検討

- 関連研究者からなるSKA Consortiumを組織、様々な検討を開始
- 惑星科学、化学、物理分野の研究者も含め、広範囲な議論
- 提案されているサイエンスケースの例

巨大有機分子のcm波帯での探査; 軽い有機分子はアルマで
宇宙磁場の起源; Faraday 回転を利用した宇宙磁場の測定

中性水素宇宙の解明; 宇宙再電離時期から、近傍・銀河系まで

3. SKA パスファインダー計画との連携の模索

- ASKAP グループとサイエンス面で連携
- LOFAR グループとサイエンス面(理論研究面等)で連携など

天体宇宙物理学関連衛星計画

- SPICA (Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics)
 - 口径3.2mの全冷却赤外線望遠鏡
 - 日本の宇宙航空研究開発機構が主導する、欧州宇宙機構等との国際協力ミッション
 - 2018年度打ち上げをめざす
- ASTRO-H
 - 日本で6番目のX線天文観測衛星
 - 日本の宇宙航空研究開発機構が主導する国際協力ミッション
 - 2013年度打ち上げをめざす

SPICA: 次世代赤外線天文衛星

SPICA
Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics



■ 銀河誕生と惑星系起源の解明

■ 概要

- 圧倒的な高感度・高分解能
- 6Kの全冷却赤外線望遠鏡
- 口径3.2m 望遠鏡
- 2018年度打上げを目指す

■ 日本が発案・主導する国際ミッション

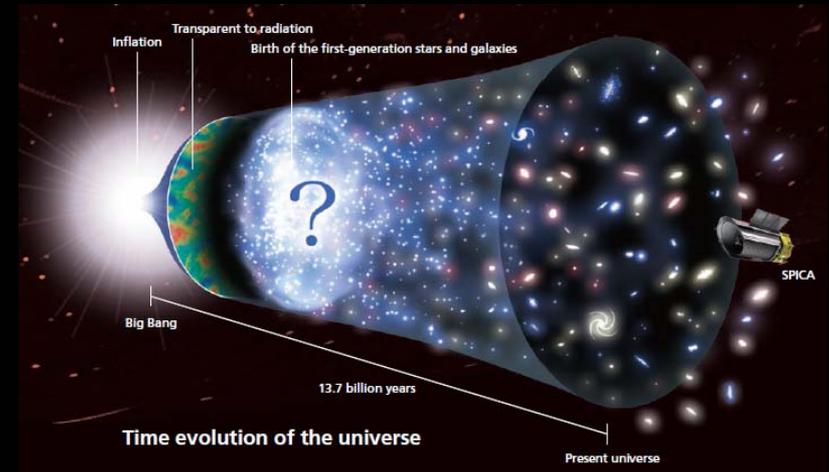
- 欧州: ESA Cosmic Vision の枠組み、14カ国からなるコンソーシアム結成
- 韓国: KASIを中心にチーム結成
- 米国: 参加を検討中

150万km
彼方の
宇宙天文台

SPICAが解明するもの： 我々はなぜ、かく在るのか？

■ 宇宙の物質輪廻の解明

- 我々人間を構成する各種の元素は、宇宙137億年の歴史のどこで、どのように生まれたのか？

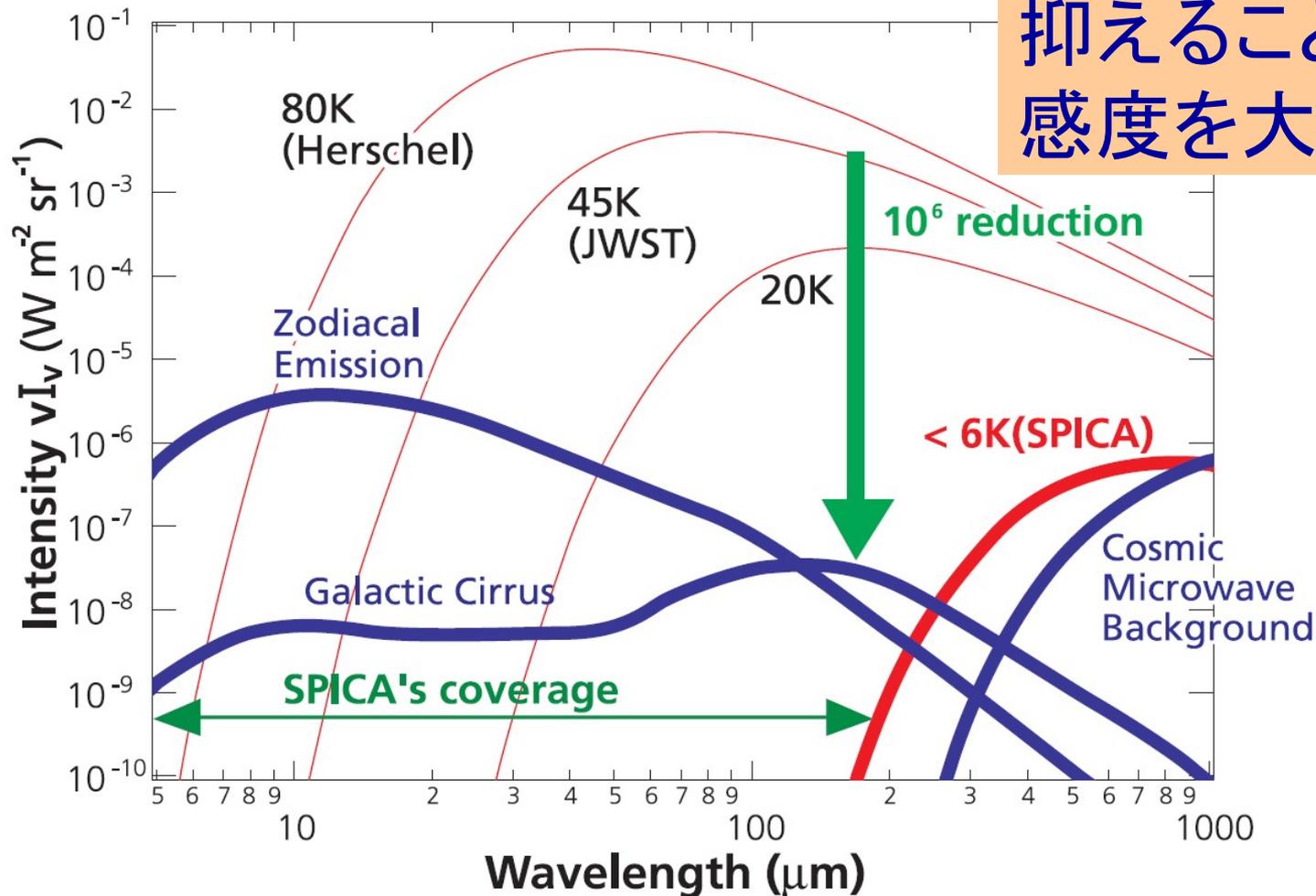


■ 惑星系のレシピ

- 我々を育んだ惑星はどうやって生まれたのか
- 生命の誕生？われわれは宇宙で独りぼっちなのか？

SPICA = *Cool* Mission !

望遠鏡の熱放射を抑えることにより、感度を大幅に向上



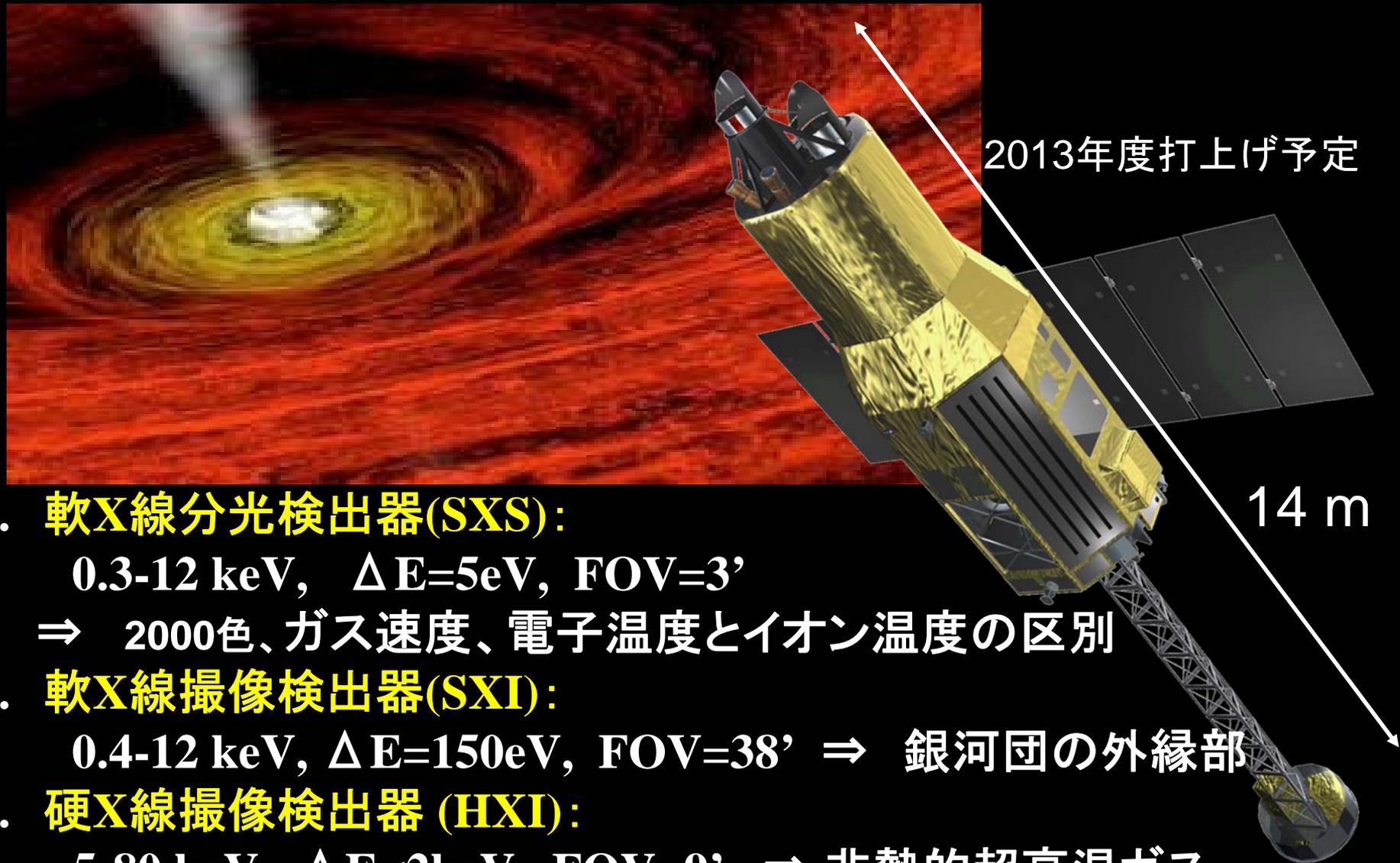
SPICA: 国際的な評価と支援

- **日本**
 - 学術会議においてマスタープランの一つとして採択
 - **欧州**
 - ESA Cosmic Vision にて将来ミッション候補として選定
 - **米国**
 - ASTRO 2010にて、米国のSPICAへの参加が推薦される
 - **韓国**
 - 長期大型科学計画の中で高い位置づけ
- 
- **世界の赤外コミュニティはSPICAに統合**
 - 世界をリードする千載一遇のチャンス

天体宇宙物理学関連衛星計画

- SPICA (Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics)
 - 口径3.2mの全冷却赤外線望遠鏡
 - 日本の宇宙航空研究開発機構が主導する、欧州宇宙機構等との国際協力ミッション
 - 2018年度打ち上げをめざす
- ASTRO-H
 - 日本で6番目のX線天文観測衛星
 - 日本の宇宙航空研究開発機構が主導する国際協力ミッション
 - 2013年度打ち上げをめざす

宇宙X線衛星ASTRO-H



1. **軟X線分光検出器(SXS):**

0.3-12 keV, $\Delta E=5\text{eV}$, FOV=3'

⇒ 2000色、ガス速度、電子温度とイオン温度の区別

2. **軟X線撮像検出器(SXI):**

0.4-12 keV, $\Delta E=150\text{eV}$, FOV=38' ⇒ 銀河団の外縁部

3. **硬X線撮像検出器(HXI):**

5-80 keV $\Delta E<2\text{keV}$, FOV=9' ⇒ 非熱的超高温ガス

4. **軟ガンマ線検出器(SGD):** 100-600 keV 撮像性能無し

ASTRO-H : 目的

■ 宇宙の大構造とその進化の解明

- 銀河団という宇宙最大の天体におけるエネルギー収支(熱的・非熱的・運動)を解明することで、銀河団の動的進化史を直接構築

■ 宇宙の極限状態の理解

- 厚い周辺物質に隠された遠方(過去)の巨大ブラックホールを「すぎく」の約100倍の感度で観測し、その進化と銀河形成に果たす役割を解明

■ 多様性にとんだ非熱的エネルギー宇宙の探求

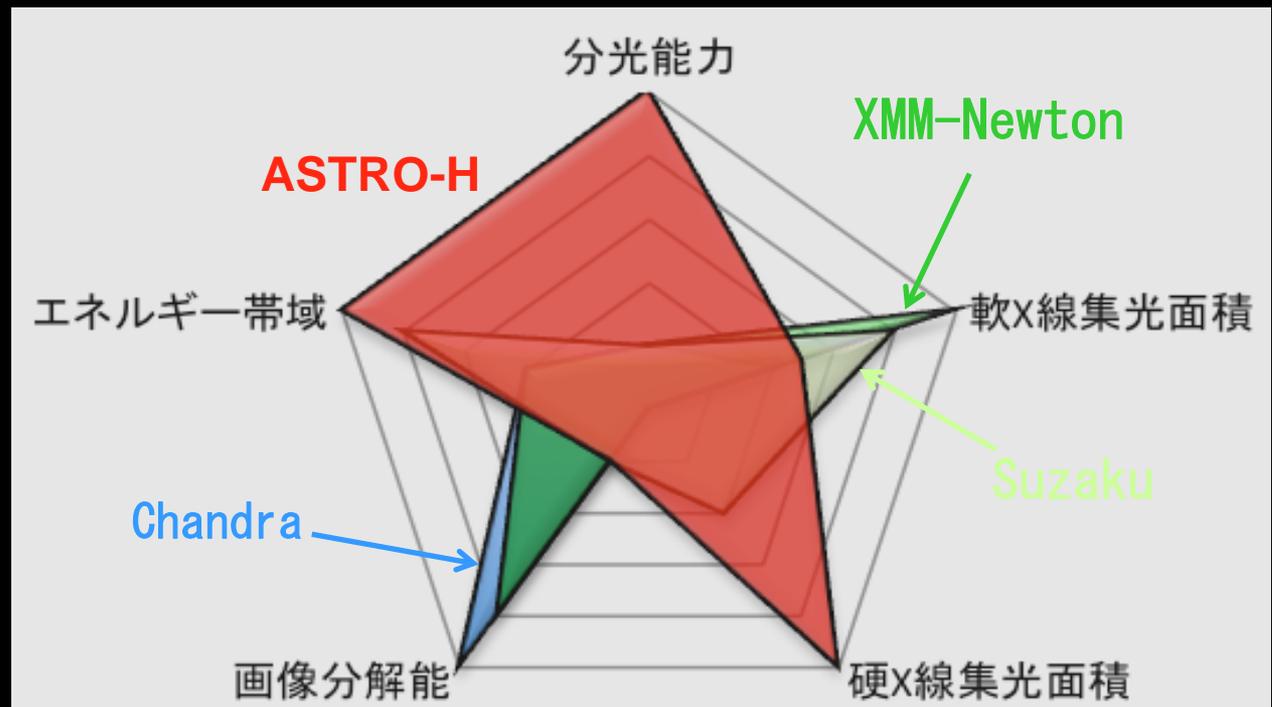
- ブラックホール極近傍の物質の運動を測定し、相対論的時空の構造を解明
- 重力・衝突・爆発による宇宙線加速現場の直接観測にもとづく宇宙線の起源の探求

■ ダークマター・暗黒エネルギーの探求

- 銀河団内のダークマターの分布と総質量の測定を通じて、ダークマターと暗黒エネルギーの性質を解明

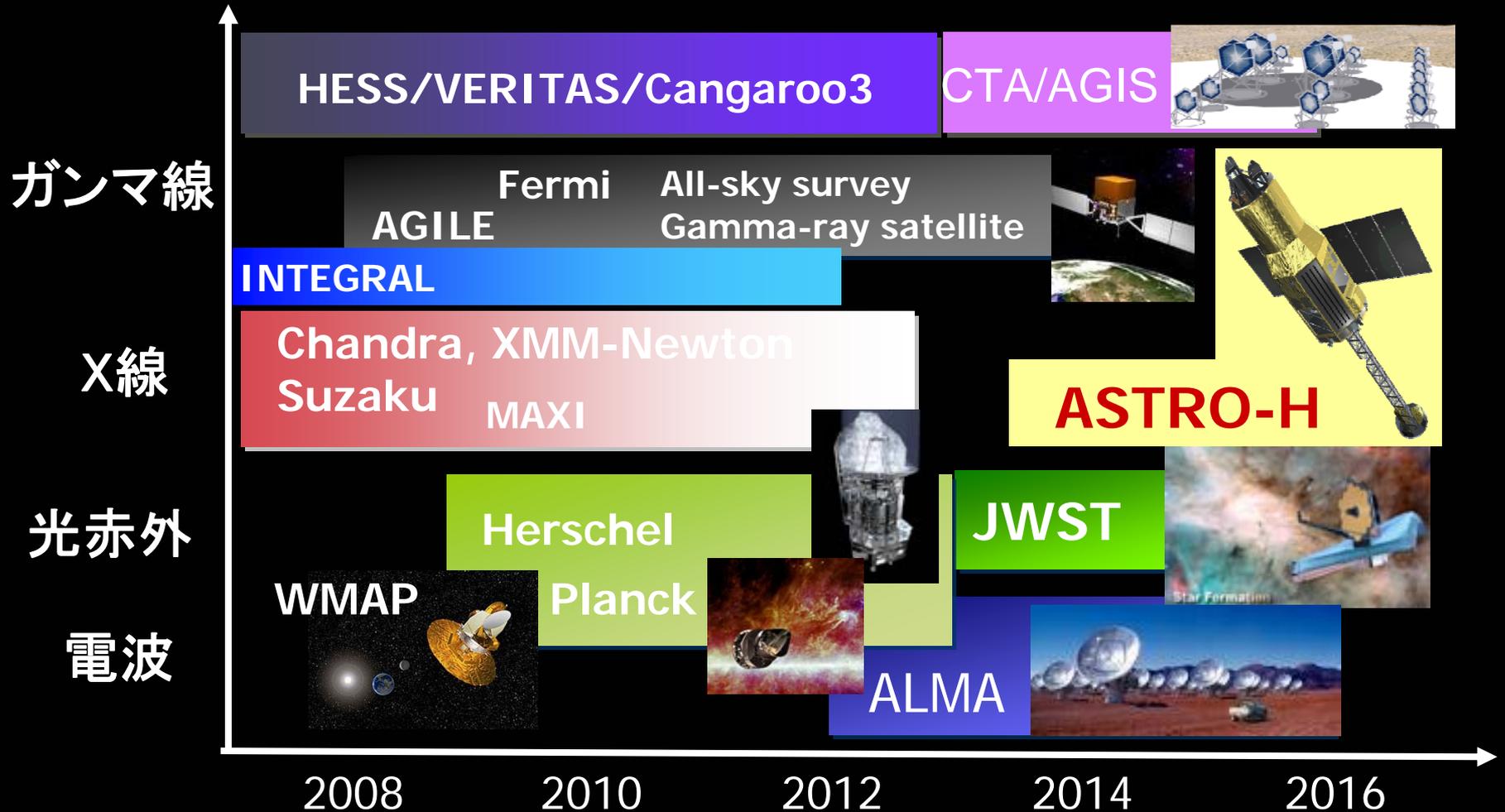
ASTRO-H : 特徴

- はくちょう、てんま、ぎんが、あすか、すざくに続く日本の第6番目のX線天文衛星
- 世界初の**硬X線撮像分光観測**
- 世界初の**マイクロカロリメータによる超高分解能X線分光観測**
- **(0.3—600) keV**の3桁以上にもわたる史上最高の高感度広帯域X線観測



ASTRO-H : 国際的意義

2010年代半ばに「軌道上X線天文台」として機能する唯一の衛星
ALMA(サブミリ波)、JWST(光赤外)、Fermi(ガンマ線)などと高い相補性



2010年代の日本の天体宇宙物理大型計画

重力波
(地上)



LIGO



LCGT

重力波の直接検出

光赤外
(地上)

SUBARU



生命探査と宇宙の夜明け

TMT

電波
(地上)

ALMA



SKA

宇宙暗黒時代と
銀河進化



赤外線
(衛星)



AKARI

SPICA



銀河誕生と
惑星系の起源

X線
(衛星)



SUZAKU

ASTRO-H

数千万度の極限宇宙探査

2008

2010

2012

2014

2016

2018

2020