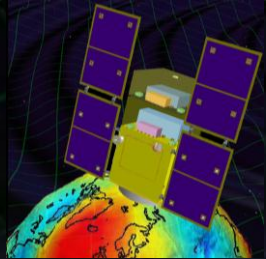
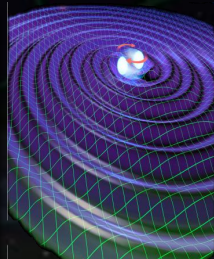


# これまでの研究と 今後の研究計画

安東 正樹 (国立天文台)



# 目次

---

- 背景と位置づけ
- これまでの研究活動
- 今後の研究計画
- 教育への抱負
- まとめ



# 背景と位置づけ

# 研究の目標

## 重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を、  
先進的な実験手法で研究  
→ 宇宙の成り立ちと進化  
対する新しい知見.



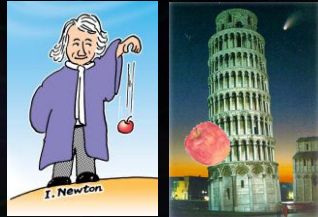
重力波天文学の創成と発展, 基礎物理研究



# 重力・重力波物理学

時空の成り立ちを探る

## 重力

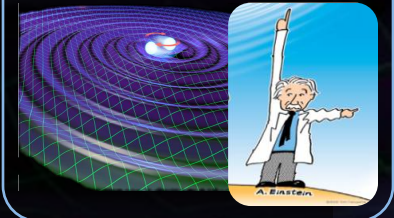


## 宇宙の成り立ちと進化



宇宙を  
探る新しい目

## 重力波

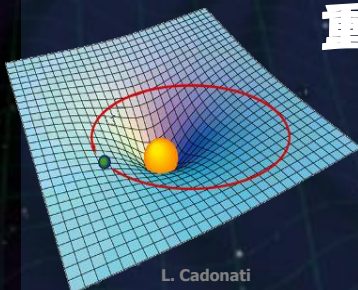


## 基礎物理研究 微小計測技術

背景画:  
佐藤 勝彦  
「相対性理論における時間と宇宙の誕生」

# 重力・重力波の物理学

## 一般相対性理論



重力：時空の性質

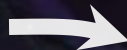
アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の歪み

質量  
(エネルギー・運動量)

変動成分



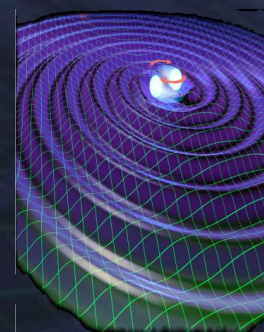
## 重力波

重力波天文学

宇宙を探る新しい目

激しい天体現象

誕生直後の宇宙の姿



測定成分



## 重力

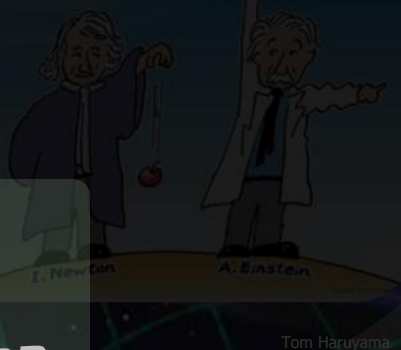
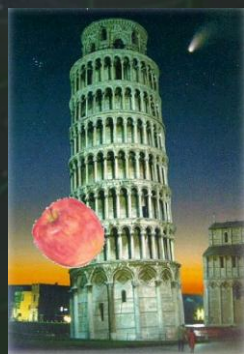
時空の成り立ちを探る

現代物理学の諸問題への知見

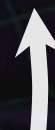
高次元時空, 重力子の振る舞い

基礎物理法則に対する知見

重力の逆二乗則, 等価原理



観測



## 微小変動測定

マクロな系の微小変動計測

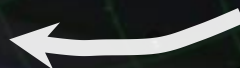
レーザー干渉計

量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧, 冷却

熱雑音, 地面振動

測定





# 重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team



# 初期宇宙の観測



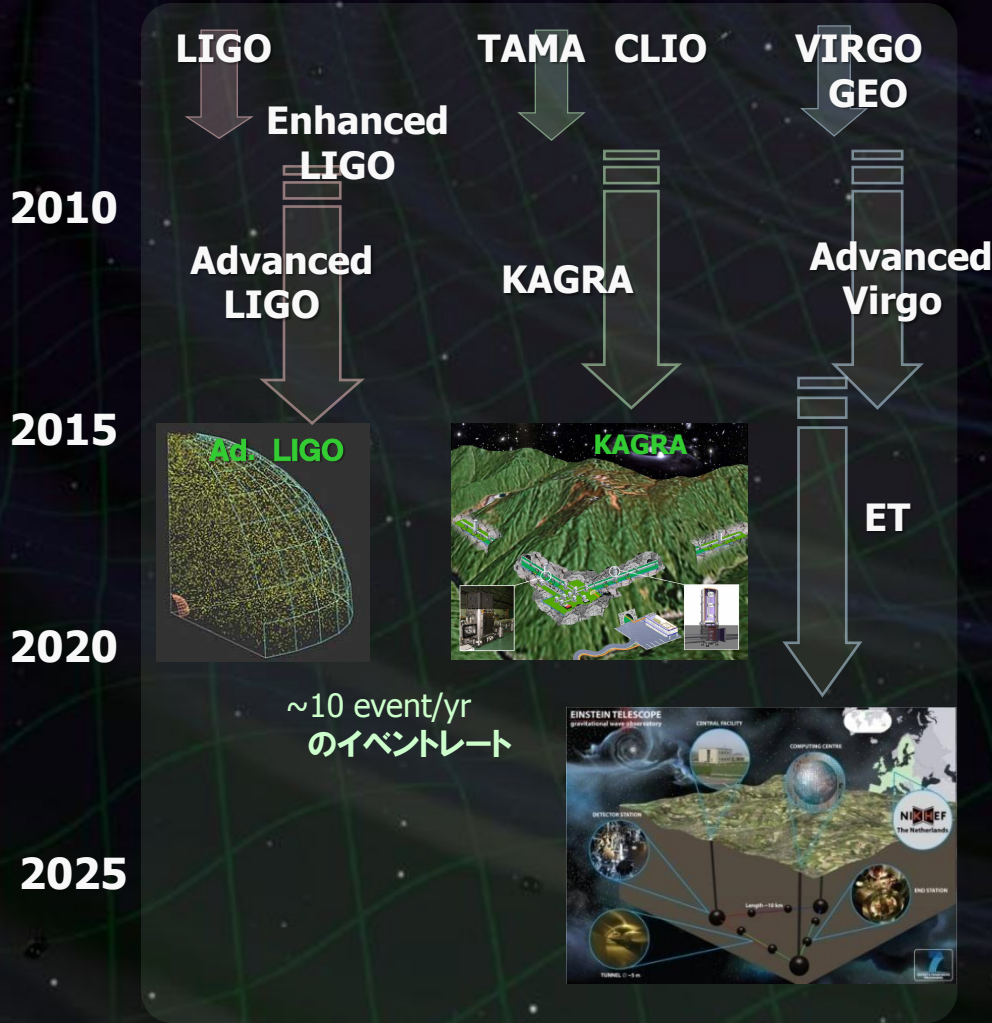
Background:  
original figure by  
NASA/WMAP Science Team



# 重力波天文学のロードマップ

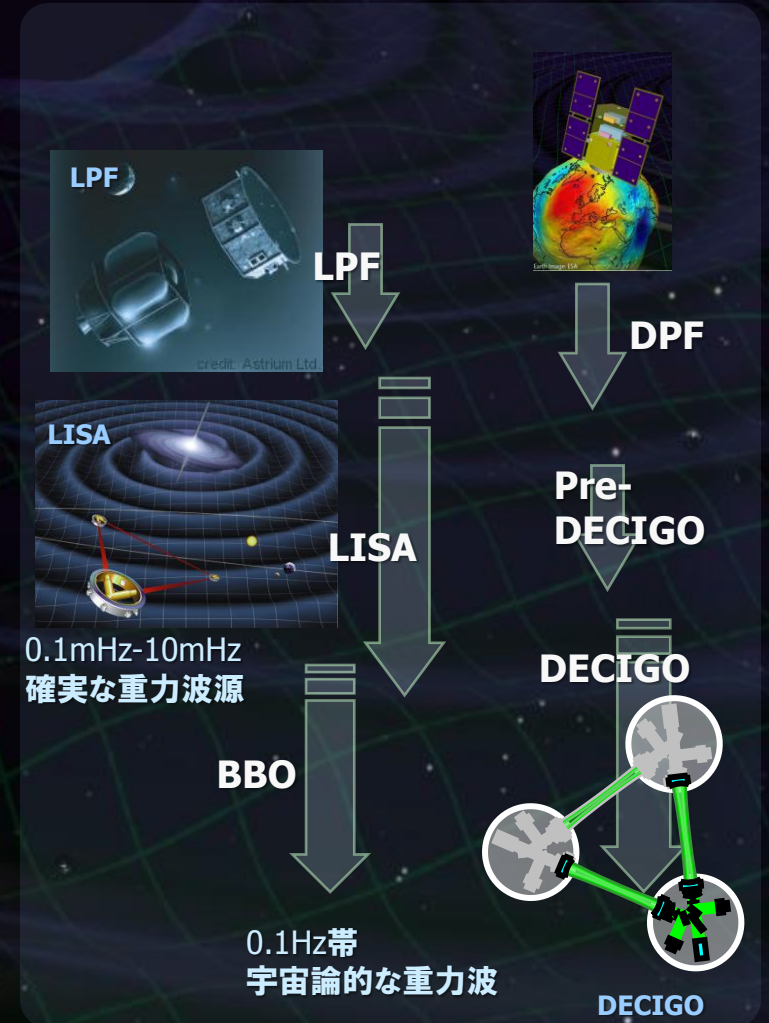
## 地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



## 宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測 (1Hz以下)



# 重力波天文学のロードマップ

## 地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)

## 宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測 (1Hz以下)

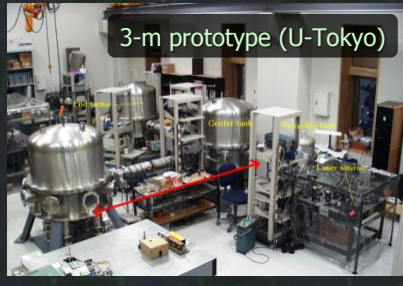




# これまでの研究

# 研究歴の概要

## レーザー干渉計の基礎研究



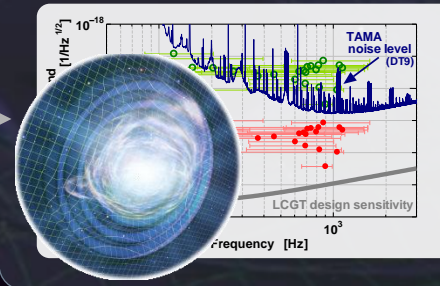
1995

## 大型重力波検出器の開発



2000

## 観測データの解析・信号探査



2005

2010

重力波天文学の創成を目指し、  
研究分野を牽引してきた。

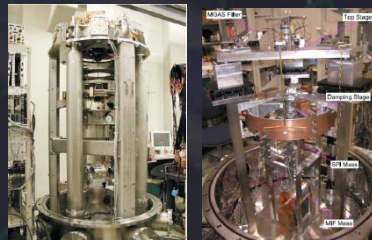
## KAGRAの基本設計



## KAGRA計画の推進 NAOJ-GW取りまとめ

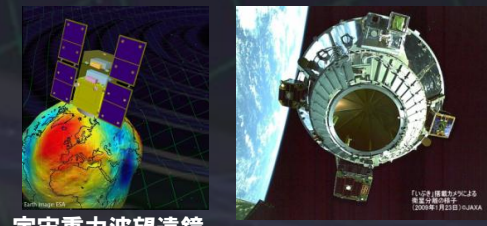
Executive Committee  
System Engineering Office

## 先進技術の基礎研究



干渉計・防振装置・熱雑音

## 宇宙重力波望遠鏡の開発

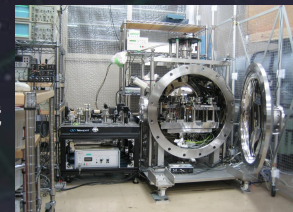


宇宙重力波望遠鏡  
計画 DECIGO/DPF

宇宙実証モジュールSWIM

## 新しい重力波望遠鏡方式 基礎物理実験への応用

ねじれ振り子装置  
↓  
TOBA重力波望遠鏡  
重力法則検証





# レーザー干渉計型重力波検出器

基本: マイケルソン干渉計  
レーザー光源からの光を  
直交する2方向に分岐

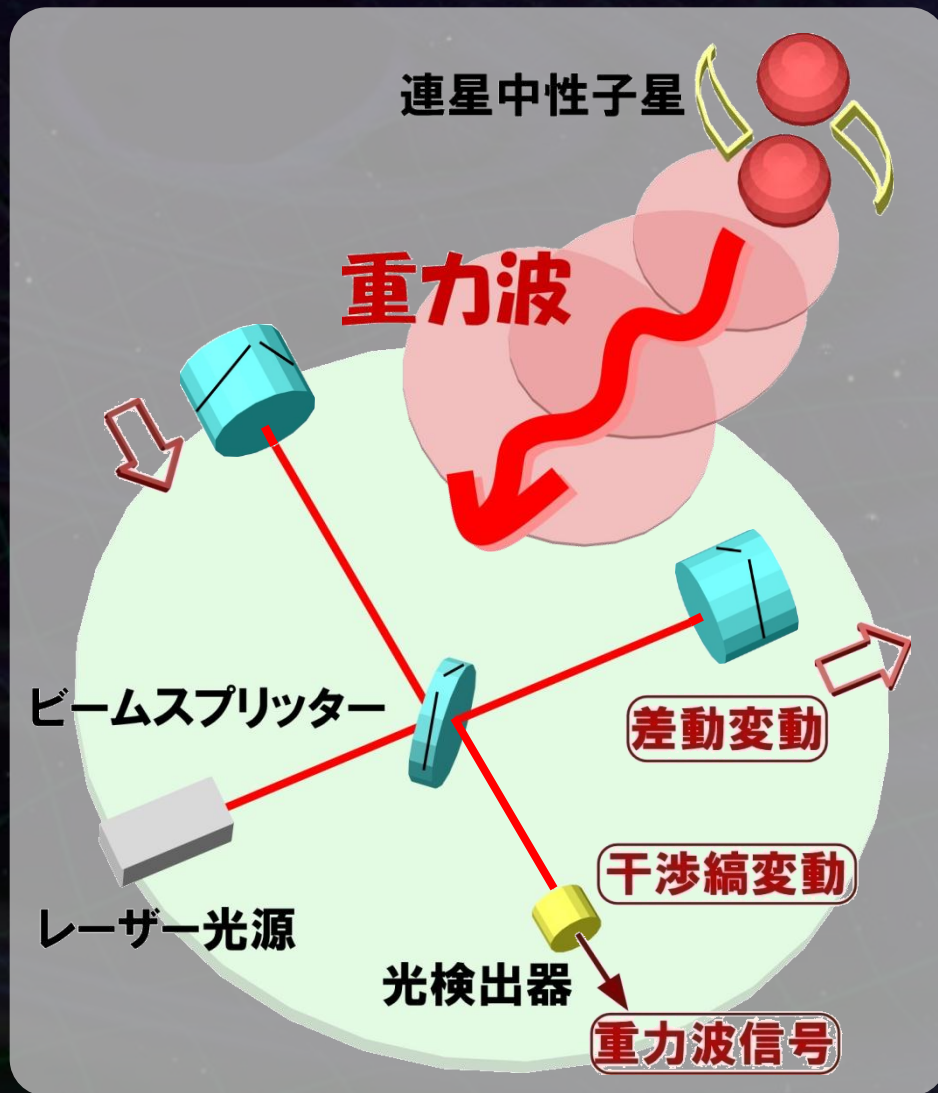


それぞれ、鏡で打ち返し干渉させる  
干渉光を光検出器で観測する

重力波が入射



腕の長さの差動変動を  
干渉光量の変動として検出



# レーザー干渉計高感度化のための基礎実験

## パワーリサイクリング技術の開発

- 干渉計内の光強度を増加させ  
干渉計感度を向上させる技術.
- 当時は未実現.



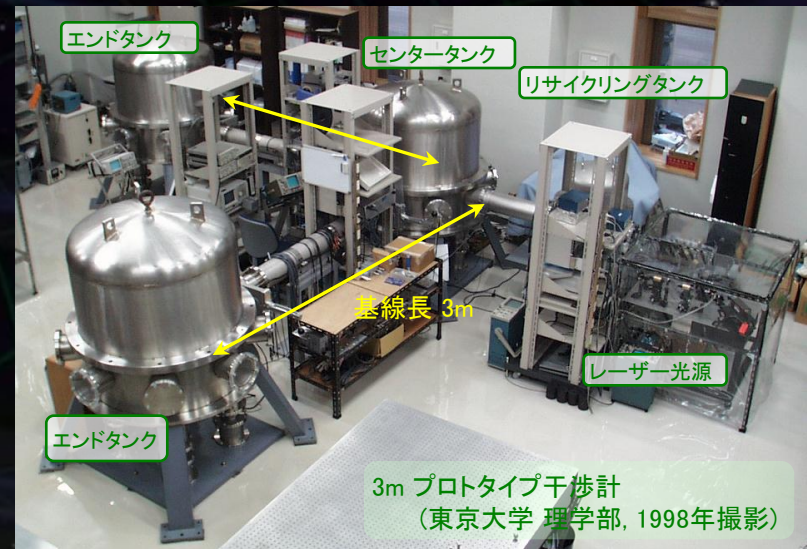
## ☆ 基線長3mのプロトタイプ干渉計で実験

- 世界最初のパワーリサイクリング実現.
- 独自の制御信号取得法を考案  
→ 実験的にその効果を確認.

MA+, PLA (2000), PLA (1998), PLA (1997)  
東京大学 博士論文 (1998年度)

⇒ 2002年度 宇宙線物理学 奨励賞

- TAMA等のための重要な実証実験.
- 干渉計研究の新たな方向性を示した.





# 干渉計型重力波検出器の開発・観測

## 重力波検出器 TAMA300

- 銀河系内を観測可能な感度  
(世界最高感度 2000-2002年)
- 他の干渉計に先駆けた観測運転  
(3000時間を超える観測データ)

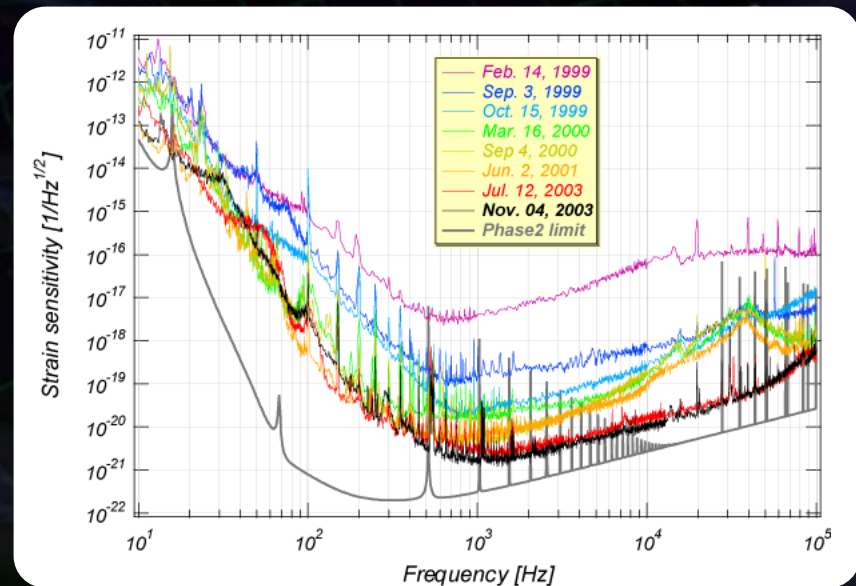


### ☆TAMA300に初期より参加

- 設計・コミッショニングで中心的役割.
- 観測運転・状態モニタシステムの構築.

MA+, PRL (2001), CQG (2002), CQG (2005) など

- 世界における拠点としての認知.
- 大型干渉計の経験・知見の蓄積.



# 観測データの解析・重力波信号探査

## 超新星爆発からの重力波信号探査

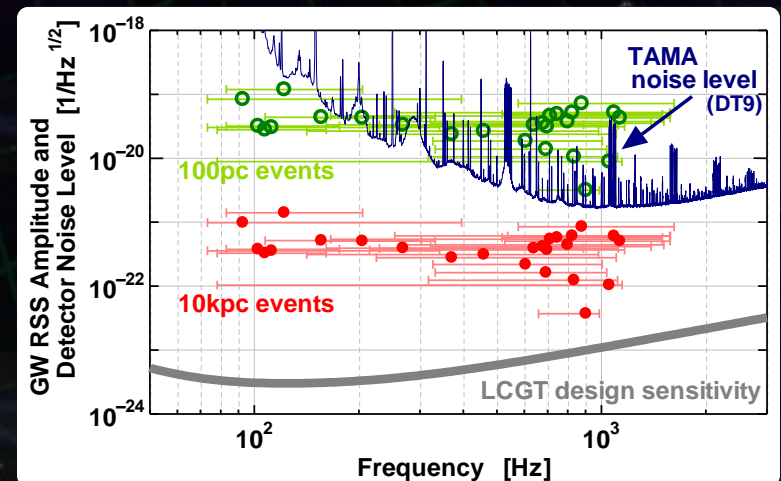
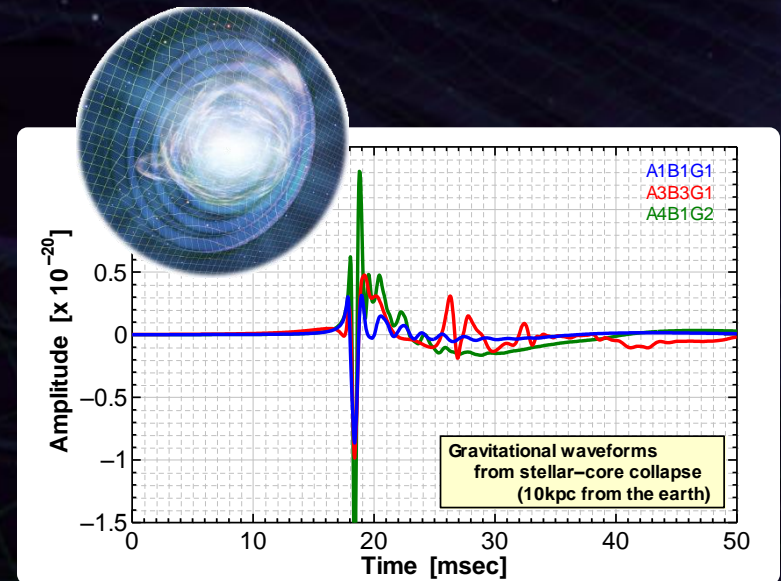
- 波形が予測できない
  - 非定常雑音との区別が困難
- ⇒ 確立された手法がない

☆ 効率的な信号抽出・非定常雑音除去手法を考案・実装 → TAMA300データに適用.

- データ解析手法を確立
- 非定常雑音処理法, 天文学的解釈手法などにおいてオリジナリティ.
- LIGOとの共同解析を推進し結果を得る.

MA+ PRD (2005), CQG (2005), PRD (2006) など

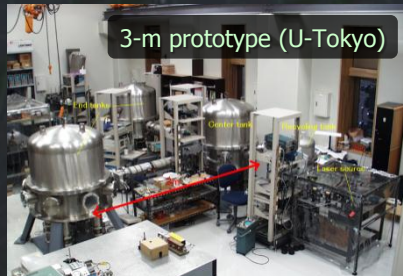
- 国内のデータ解析研究の拡大.
- 国際協力体制の確立に貢献.





# 研究歴の概要

## レーザー干渉計の基礎研究



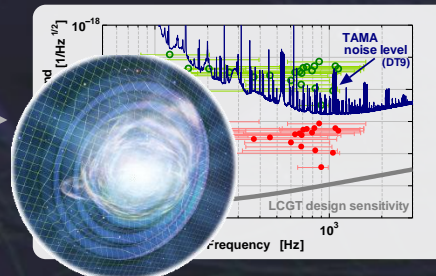
1995

## 大型重力波検出器の開発



2000

## 観測データの解析・信号探査

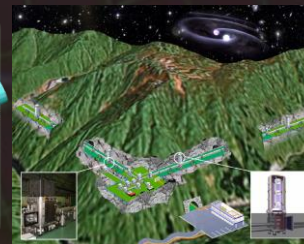


2005

2010

重力波天文学の創成を目指し、  
研究分野を牽引してきた。

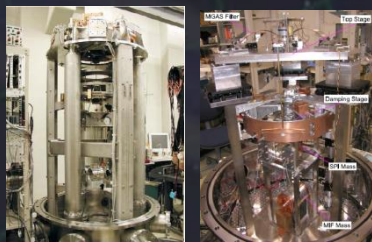
## KAGRAの基本設計



## KAGRA計画の推進 NAOJ-GW取りまとめ

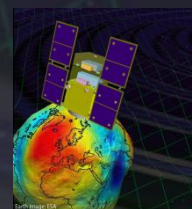
Executive Committee  
System Engineering Office

## 先進技術の基礎研究

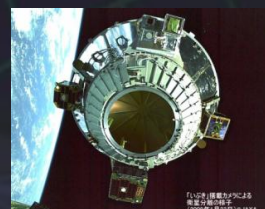


干渉計・防振装置・熱雑音

## 宇宙重力波望遠鏡の開発



宇宙重力波望遠鏡  
計画 DECIGO/DPF



宇宙実証モジュールSWIM

## 新しい重力波望遠鏡方式 基礎物理実験への応用

ねじれ振り子装置  
↓  
TOBA重力波望遠鏡  
重力法則検証

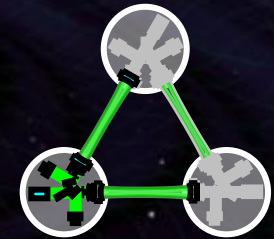
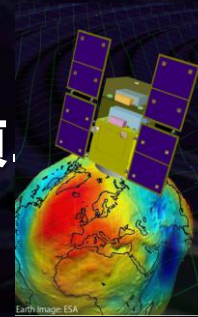




# 宇宙重力波望遠鏡の開発

## 宇宙重力波望遠鏡 (DECIGO/DPF)

- 本格的な重力波天文学・宇宙論のためには必須
  - 実現には多大な時間・リソースを必要とする。
- ➡ 着実な基礎開発研究が必要。



## ☆宇宙重力波望遠鏡の開発・プロジェクト運営

- 宇宙重力波望遠鏡DECIGOの基本設計。
  - 小型科学衛星DPFのミッション設計。
  - 超小型宇宙実証モジュールSWIM
- ➔ 世界初の宇宙重力波検出器 (2009年

MA+, CQG (2010), CQG (2009), 物理学会誌 (2010) など

- 宇宙ミッションへの最初の一步。
- 魅力ある研究として分野の拡大  
(若手学生, 宇宙工学・周辺分野研究者)。

### 超小型宇宙重力波検出器

2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

➔ 世界で最初の 宇宙重力波検出器

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass  
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

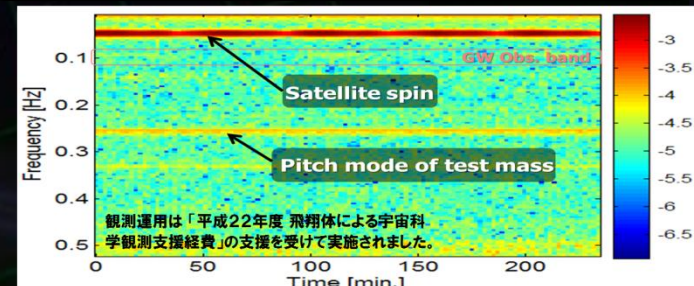
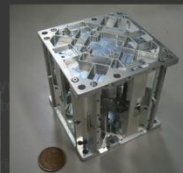
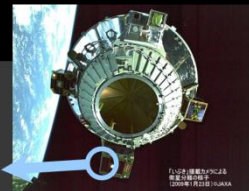
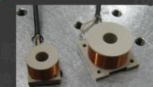
#### Test mass

~47g Aluminum, Surface polished  
Small magnets for position control



#### Photo sensor

Reflective-type optical displacement sensor  
Separation to mass ~1mm  
Sensitivity ~  $10^{-9}$  m/Hz<sup>1/2</sup>  
6 PSs to monitor mass motion





# 新しい重力波望遠鏡方式

## ねじれ型重力波望遠鏡 (TOBA: Torsion-Bar Antenna)

- 新しいアイデアによる重力波望遠鏡方式.
- 低周波数・極低周波数の観測を可能に.

### ☆設計検討・プロトタイプ開発.

- 小型TOBAの開発と観測運転.  
→ 0.2Hz帯の背景重力波に初めての上限値.
- 東京-京都2台での同時観測運転.
- 超小型宇宙実証モジュールSWIM  
→ 世界初の宇宙重力波検出器 (2009年)

MA+, PRL (2010), 物理学会誌 (2010)

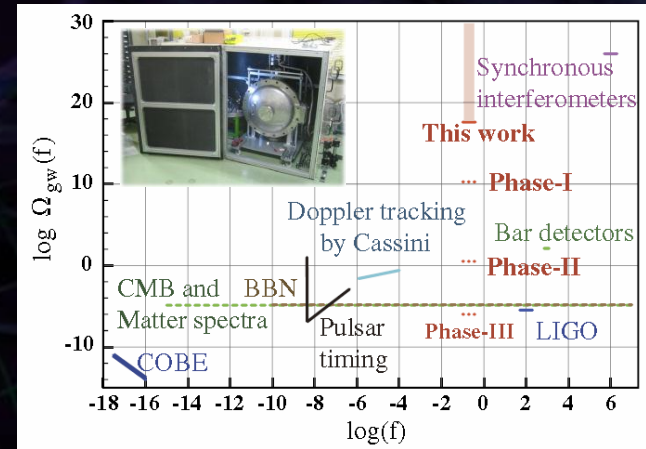
K.Ishidoshiro MA+, PRL (2011) → ハイライト記事に選ばれる.

石徹白晃治 博士論文 (2009) → 物理学会若手奨励賞 (2011年度)

穀山渉 修士論文 → 東京大学 奨励賞 (2008年度)

A.Shoda GWPAW Poster Award (2010) など

- 重力波研究の新しい方向性.
- 学生・海外研究者の活躍の場.



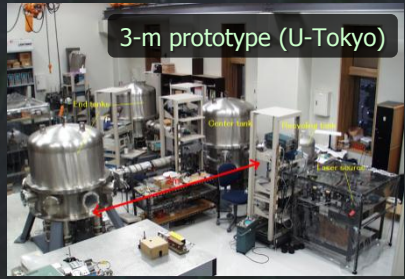
The screenshot shows the Physical Review Letters website interface. The main article highlighted is "Physics: Tuning in to gravity" by Robert Owen, Jeanseund Brink, Yanbei Chen, Jeffrey D. Kaplan, Geoffrey Lovelace, Keith D. Matthews, David A. Nichols, Mark A. Scheel, Fan Zhang, Aaron Zimmerman, and Kip S. Thorne, published in Phys. Rev. Lett. 106, 151101 (2011). The article is dated April 15, 2011. The website also shows other articles and navigation options.

Phys. Rev. Lett. 誌 Highlight記事 (April 2011)



# 研究歴の概要

## レーザー干渉計の基礎研究



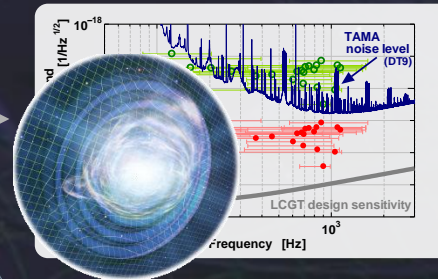
1995

## 大型重力波検出器の開発



2000

## 観測データの解析・信号探査

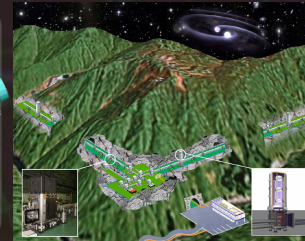


2005

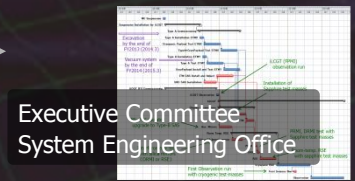
2010

重力波天文学の創成を目指し、  
研究分野を牽引してきた。

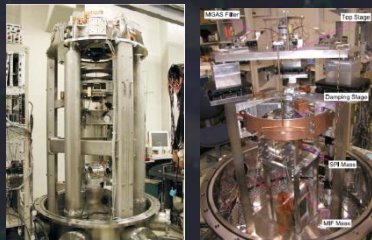
## KAGRAの基本設計



## KAGRA計画の推進 NAOJ-GW取りまとめ

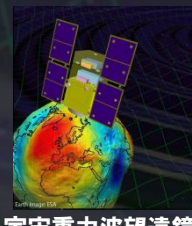


## 先進技術の基礎研究

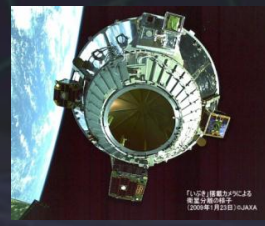


干渉計・防振装置・熱雑音

## 宇宙重力波望遠鏡の開発



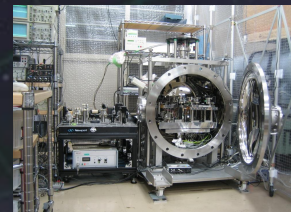
宇宙重力波望遠鏡  
計画 DECIGO/DPF



宇宙実証モジュールSWIM

## 新しい重力波望遠鏡方式 基礎物理実験への応用

ねじれ振り子装置  
↓  
TOBA重力波望遠鏡  
重力法則検証





# KAGRAの推進

## KAGRA：基線長3kmの低温大型重力波望遠鏡（岐阜県・神岡）

- 重力波の初検出が期待される。
- 2010年度建設開始。岐阜県・神岡に建設。
- 最優先で完成させるべき重力波望遠鏡。

### ☆ 計画初期より参加し、実現に貢献。

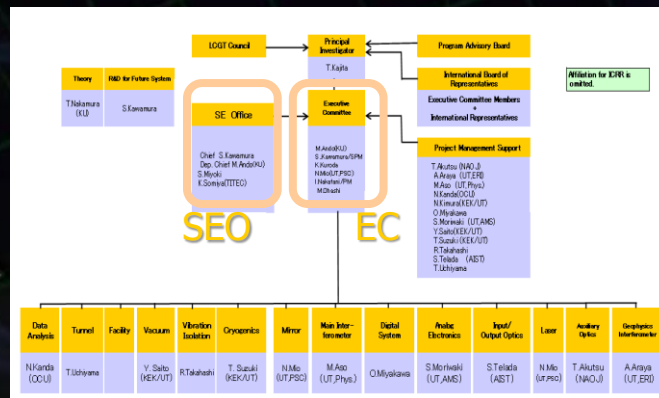
- 干渉計方式の検討と基本設計のとりまとめ。  
→ LCGT Design Document (2003)
- 現在：全体を見渡し、計画を遂行する役割。

EC (Executive Committee)

SEO (System Engineering Office)

デザインレビュー、建設計画の策定など。

- 干渉計技術/計画マネジメントの双方の知識と経験から計画遂行に貢献。



# 着任後の研究計画



# 研究の目標

- **大目標：重力波天文学の創成と発展。**  
重力を中心とした基礎物理実験



- **大型低温重力波望遠鏡 KAGRA**
  - \* 中心グループとしてプロジェクトを推進。
  - \* KAGRAによる天文学。
- **将来を見越した基礎研究開発**
  - \* KAGRAなど地上重力波望遠鏡の高感度化。
  - \* 独自の開発研究, 宇宙重力波望遠鏡。

プロジェクト推進・研究成果・人材育成

# 研究計画





# KAGRA計画の推進

KAGRAの成功: 重力波分野における**最優先事項**.

→ 重力波天文学を創成し, 分野の発展をめざす.

- 国内研究者の総力を集結. 国際協力も仰ぐ.
- 東京大学・物理教室は, **中心拠点**うちの1つ.

☆ KAGRA推進のための, **より強固な体制**を整える.

- 計画全体における, **主導的な役割**.
  - EC, SEOメンバーとして, **計画全体の推進**に貢献.
- **主干渉計**など光学系サブシステムを取りまとめる役割.
  - 既存のアクティビティを継続して推進.

# 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

基線長3kmの低温干渉計

2017年頃本格的な観測開始 → 重力波天文学の創成.



・ホスト機関：

東京大学 宇宙線研究所

・副ホスト機関：

国立天文台

高エネルギー加速器研究機構

・国内外の研究機関

東京大, 大阪市大, 東工大,  
大阪大, 京都大, 産業技術総  
合研究所, 情報通信研究機構,  
電気通信大, 山梨英和大 など.

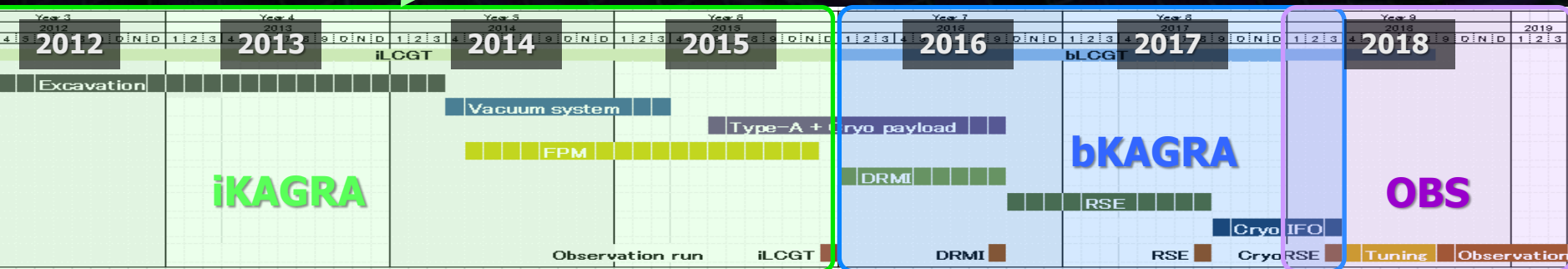


# KAGRAスケジュール

## • **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

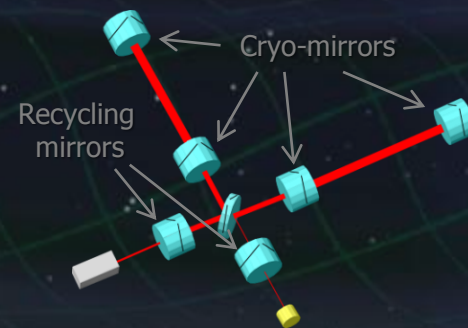
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



## • **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



# KAGRA現状

- ・施設・真空系など建設が着実に進んでいる。
  - トンネル：中央室大部分・Yエンド室 掘削済。  
Y腕部 550m.
  - 施設： 現地オフィス稼働開始.
  - 真空： 腕ダクト 90%以上が納品済。  
インストール試験施設で手順確認.
  - クライオスタット：4台の真空槽ほぼ完成.





# KAGRAの組織



# KAGRA計画の推進

- KAGRAでは, 2014年度より  
本格的な**インストール・コミッショニング**開始.
  - 先行する海外プロジェクトとの競争.
  - 予算・坑内での作業の制約.
    - 周到な事前準備,  
コミッショニング時の機動的な判断 が必要.
- ⇒ EO, SEOとして計画の策定, 遂行において、  
これまでの経験を生かした**主導的な役割**.
- 国際的なコミュニティへの貢献.
  - KAGRAとの国際協力体制.
  - 外部評価委員, レビューなど



# 天文現象およびデータ解析手法の研究

KAGRAの目標: 重力波信号の検出・新たな**天文学の創成**.

→ 周辺分野と協力し, 天文学に貢献.

- 他の重力波望遠鏡との**共同観測・解析**.
- 電磁波観測, 理論研究, 数値相対論などの知見を生かした**科学的・天文学的成果の創造**.

☆ 積極的な人材交流による, フロンティアの拡大

- データ解析 (干渉計診断, 重力波信号探査).
- 電磁波観測, 理論研究, 数値相対論などを含めた、**高エネルギー天体現象・高密度核物質の総合的理解**.

# 地上重力波望遠鏡のターゲット

地上重力波望遠鏡 -- 10Hz – 1kHz の観測周波数帯

⇒ コンパクト天体, 高エネルギー天体现象

中性子星

ブラックホール

初期宇宙

パルサー

超新星爆発

連星合体

背景重力波

軟ガンマ線リピーター

EMRI

電磁波  
ニュートリノ  
高エネルギー宇宙線

星の  
振動  
モード

長ガンマ線  
バースト

短ガンマ線  
バースト

準固有  
振動

同時観測  
数値相対論

高エネルギー天体  
現象の総合的理解

高密度天体の状態方程式  
原子核物理

相対性理論の検証  
強い重力場での物理法則



# 連星合体観測による知見

## • 重力波の初検出

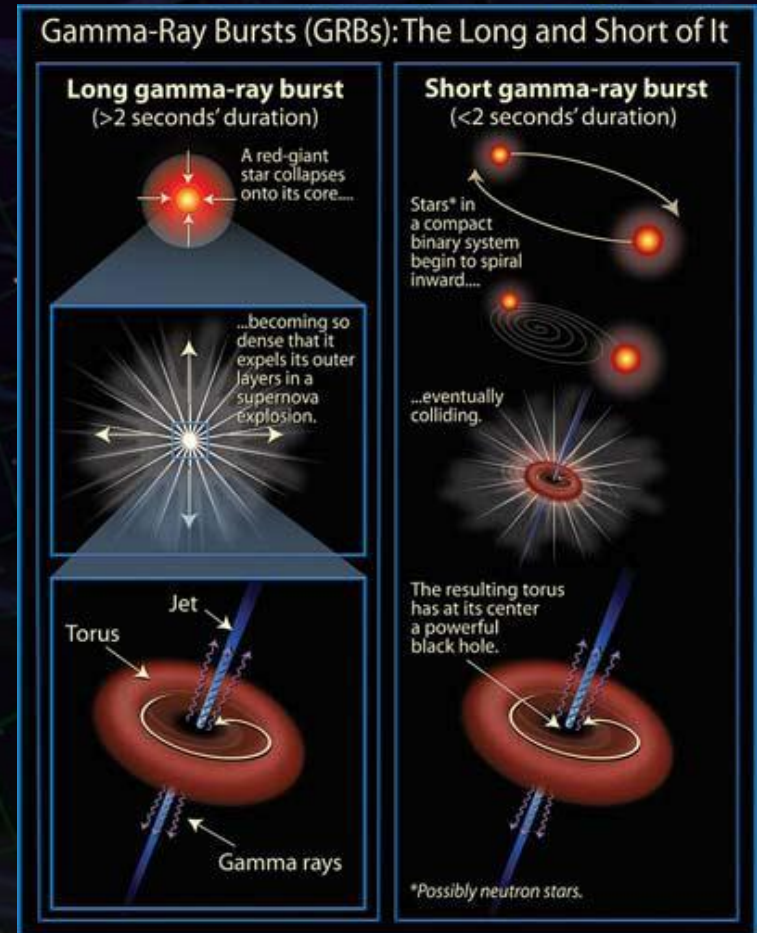
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生，
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

## • 高密度核物質の直接探査

- 中性子星の状態方程式の情報。
- 潮汐変形/破壊，HMNSの形成など。

## • 宇宙論・銀河形成史に対する知見

- 宇宙論パラメータへの制限。
- 超巨大ブラックホールの形成過程
- 連星の進化や分布の情報。



From encyclopedia of science

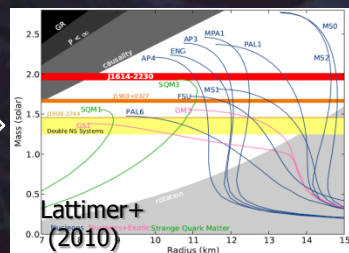
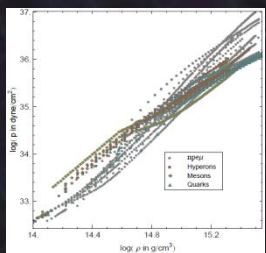
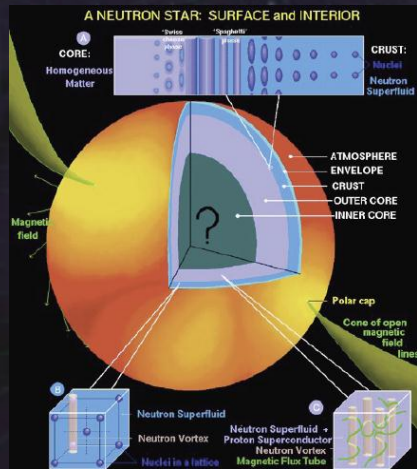
# 状態方程式と天文学

## 中性子星の状態方程式

(密度  $2 \sim 15\rho_0$ )

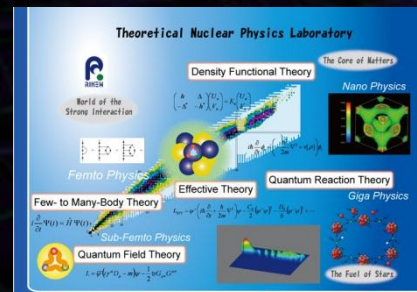
密度-圧力

中性子星の半径-質量



## 原子核理論

→ 地上実験が困難な  
高密度物質の物理  
(ハイペロンの出現など)



理研Web  
pageより

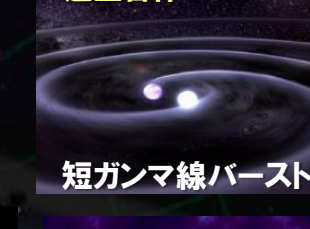
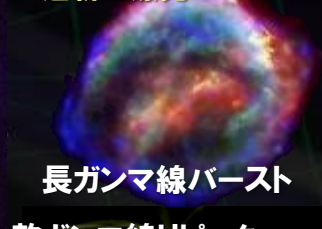
## 高エネルギー天体现象

→ 天文学, 極限状態の物理法則

電波パルサー

超新星爆発

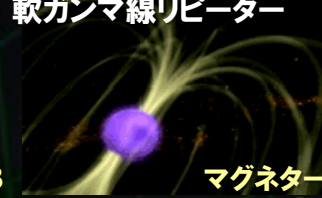
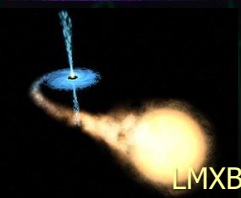
連星合体



長ガンマ線バースト

短ガンマ線バースト

軟ガンマ線リピーター



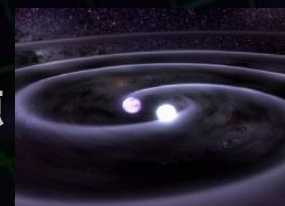
LMXB

マグネター

ブラックホール形成

## 相対論・宇宙論

連星合体 → 標準音源  
(Standard Siren)



強い重力場での重力法則  
宇宙の加速膨張観測

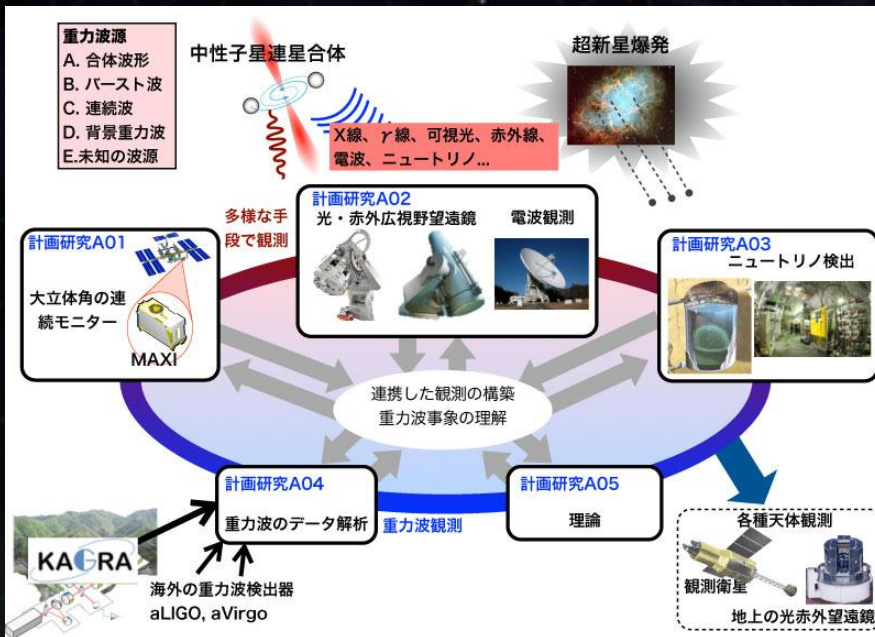
Messenger and Read, arXiv:1107.5725



# 研究計画：マルチメッセンジャー天文学

## ・重力波天文学のための理論・データ解析研究.

- 新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」  
→ 重力波の理論・データ解析, X線・光赤外・電波,  
ニュートリノによる突発天体観測.
- KAGRA, LIGO, VIRGO間のMoUが締結見込み.  
\* 重力波天文学に向けた技術協力, これまでに得られたデータの共有.



19-Sep-12

### Memorandum of Understanding between KAGRA, LIGO and Virgo Scientific Collaborations

**A. Purpose of the agreement:**

The purpose of this Memorandum of Understanding (MOU) is to establish a collaborative relationship between the signatories who are seeking to discover gravitational waves and pursue the new field of gravitational wave astronomy. The main scientific motivation is that the maximum return from gravitational wave observations is through simultaneous joint measurements by several instruments.

# 将来の本格観測のための基礎開発研究

## 重力波研究分野の継続的发展.

→ 魅力ある研究活動を通じた, 新たな人材の育成.

- 世界の最先端を担う, 独自性のある研究活動.
- 自由な発想や将来への先見性に基づく

フロンティアへの挑戦, 新しい科学的価値の創成.

## ☆ 学生らにとって魅力的な研究テーマの設定.

• ねじれ型重力波望遠鏡TOBA.

- 新しい重力波研究フィールドの開拓.
- 防振, 低温, 重力勾配雑音などKAGRAとの連携.

• 宇宙重力波望遠鏡の根幹技術開発.

• 重力などに関連する基礎物理学研究.

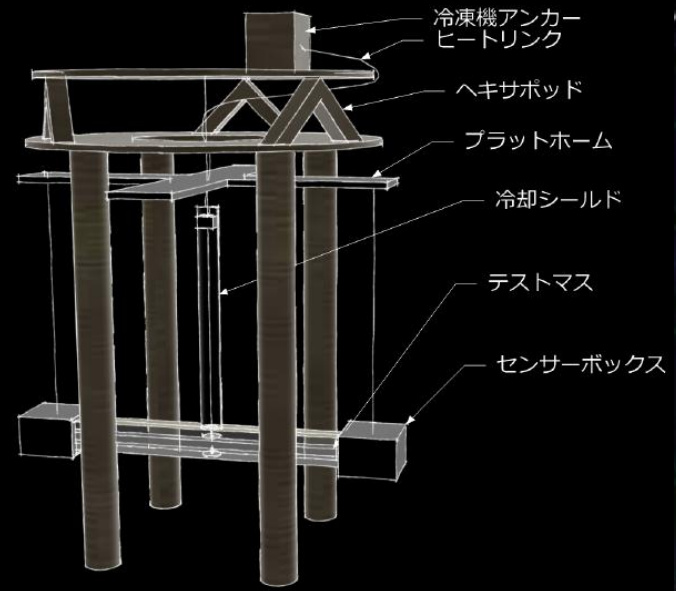
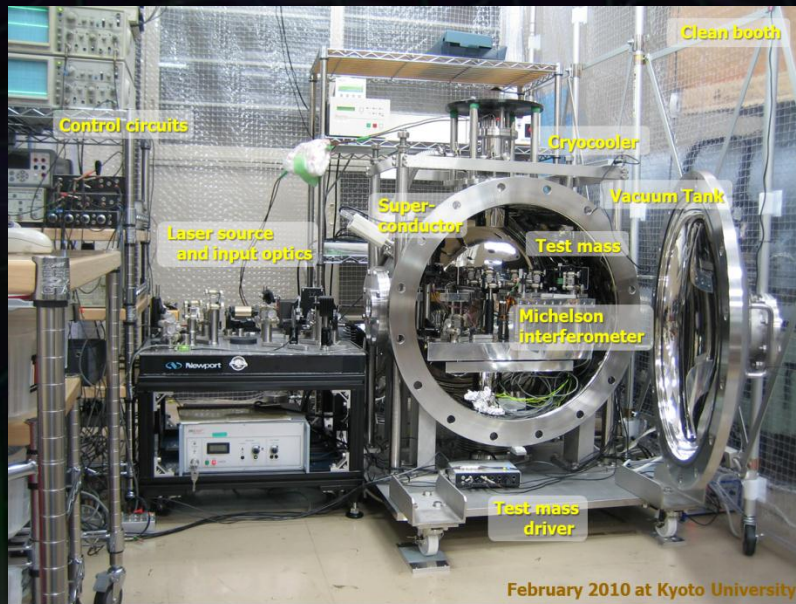


# 中型TOBAの研究開発

## 小型ねじれ型重力波望遠鏡(TOBA)

- 0.1Hzの周波数帯で世界最高感度の達成
- 観測運転. → 0.2Hz帯の背景重力波に初めての上限値.
- 東京-京都2台での同時観測運転.

⇒ 10mスケールの大型TOBAへの次のステップ：  
1m スケールの中型低温TOBA



# 中型TOBA計画

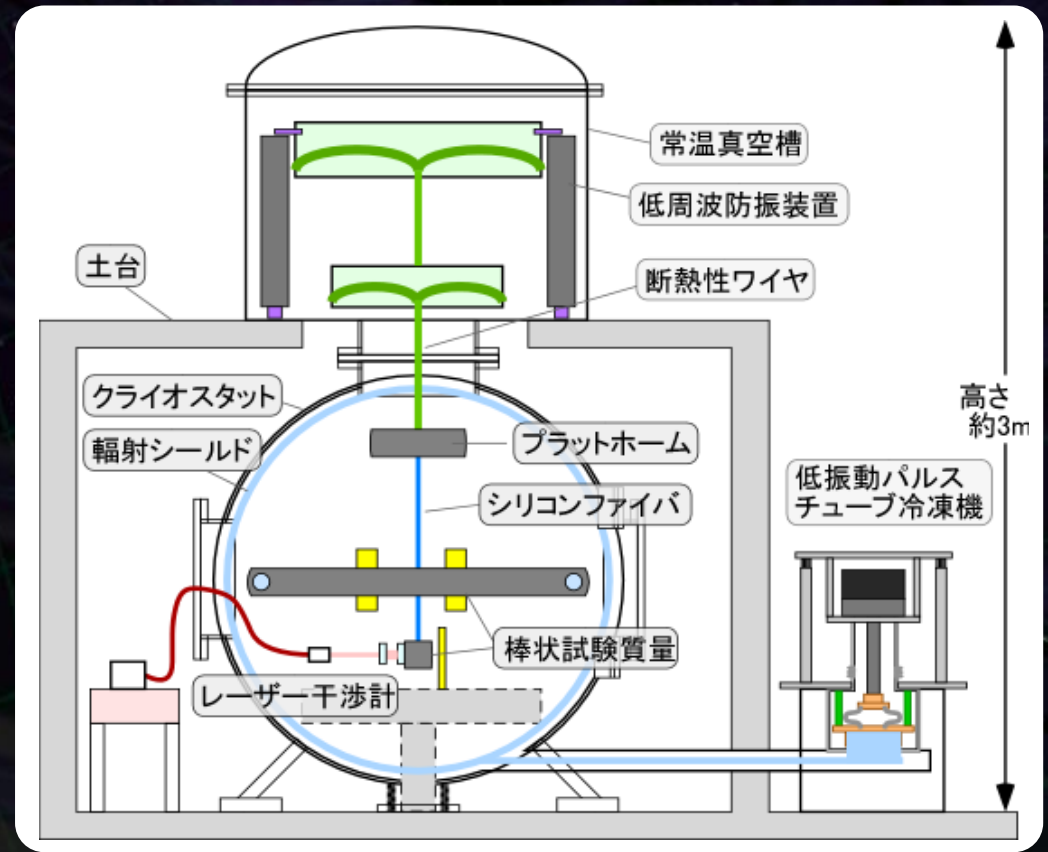
## 小型TOBAプロトタイプの実績を生かした次のステップ

(科学研究費補助金 基盤研究(A) による4年計画)

- 長さ1m程度の低温TOBA
    - 0.1Hz帯重力波の観測.
    - 重力勾配雑音の実測.
    - KAGRAとの技術共有.
- (低周波数防振, 低温懸架)



独自の重力波観測  
KAGRA等の低周波感度向上  
基礎物理研究への応用





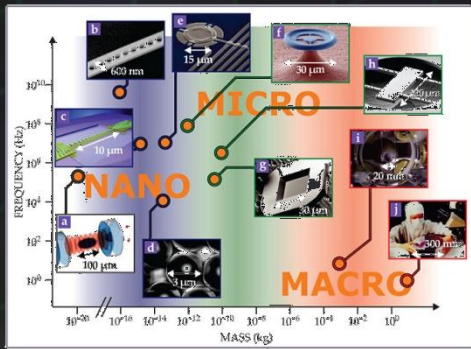
# ねじれ振り子装置の応用

低温ねじれ振り子装置 → マクロ系の微小力測定

## Gravity ISL



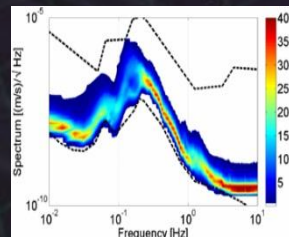
## Macroscopic Quantum Measurement



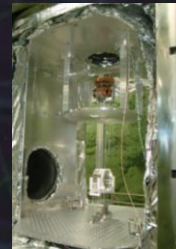
## Fundamental Physics

## Noise Investigation

### Newtonian Noise

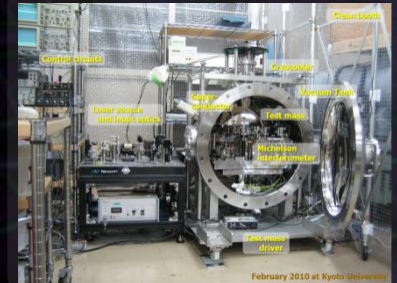


### Thermal Noise

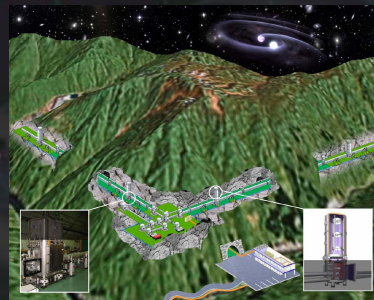


## Prototype GW detector

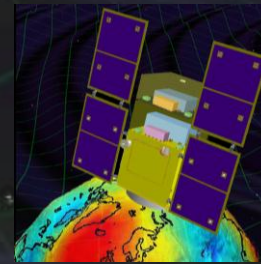
### TOBA Novel GW Detector



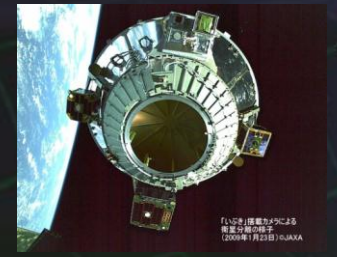
## KAGRA Terrestrial Detector



## DPF Galactic GWs Earth's gravity



## Rotation TOBA VLF GW observation



## GW Observation



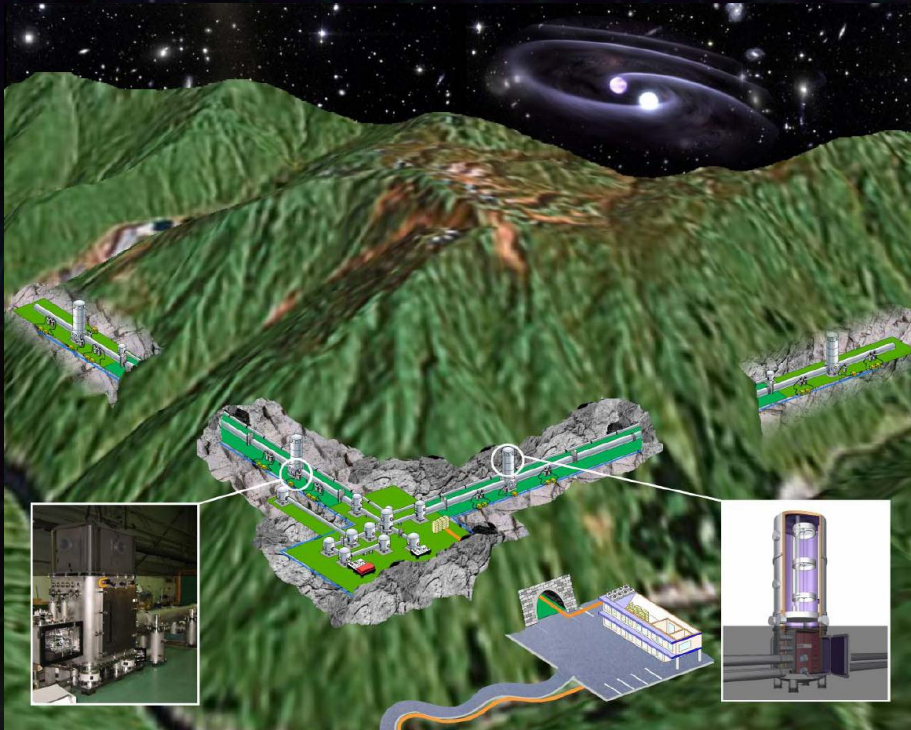
# KAGRA と DECIGO

## KAGRA (~2017)

Ground-based Detector

→ 高周波数の重力波イベント

目標: 重力波の検出, 天文学

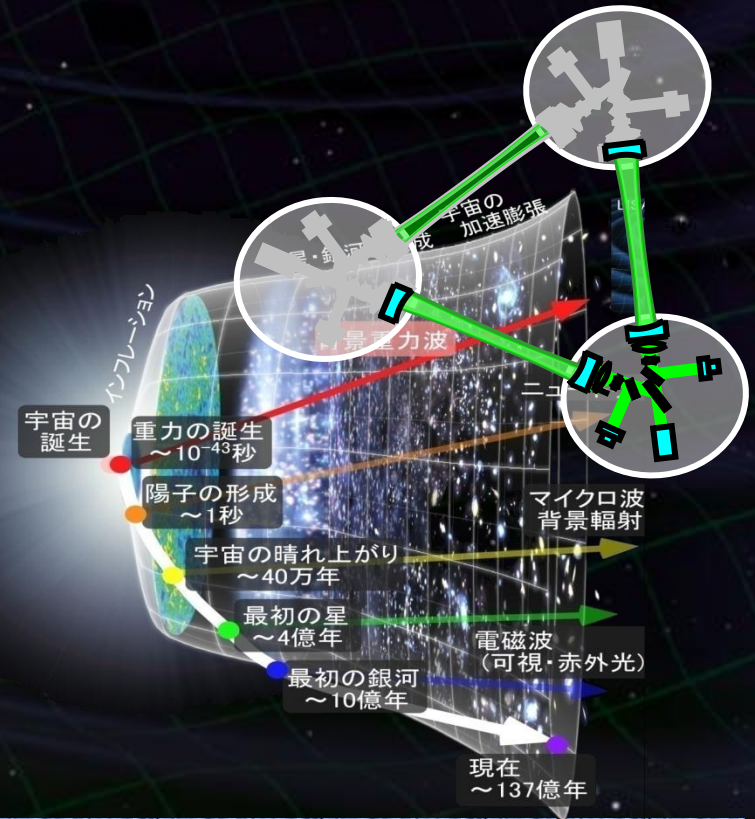


## DECIGO (~2027)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開





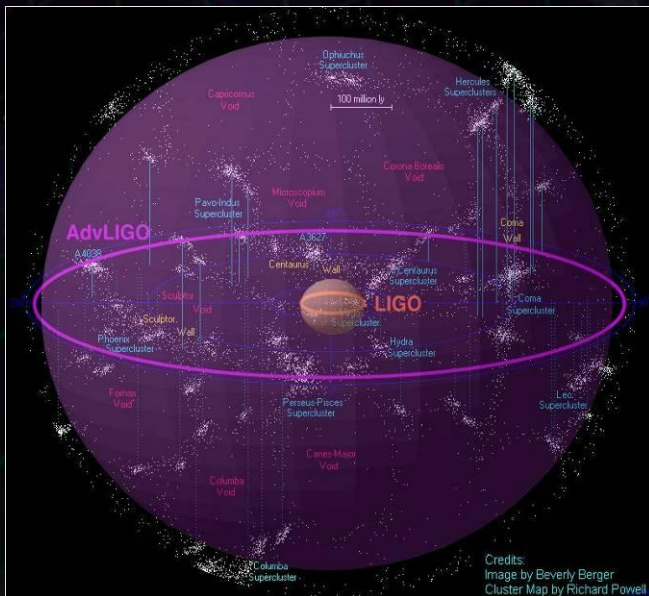
# 本格的な天文学

第一世代の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

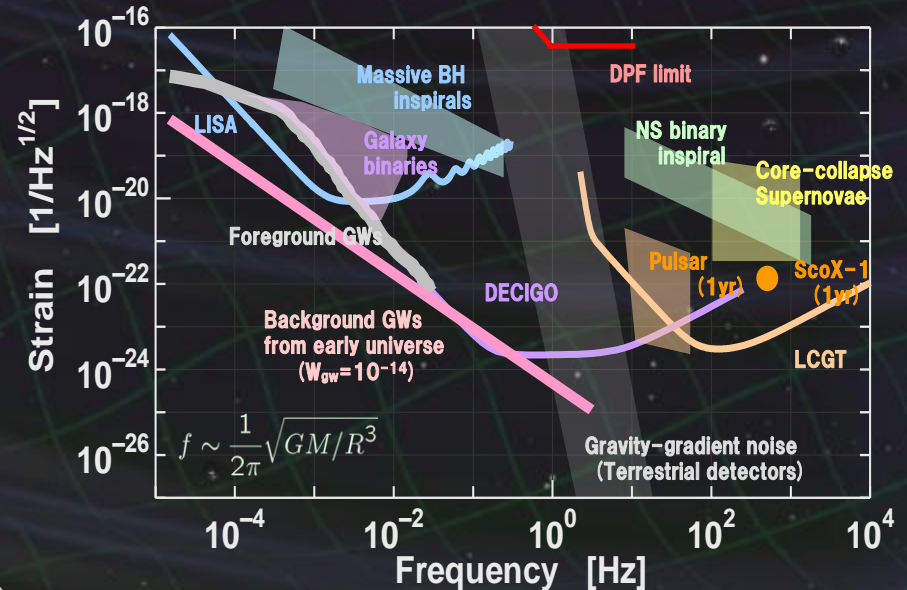
ただ... そのような重力波イベントは稀 ( $10^{-5}$ - $10^{-3}$  event/yr)

⇒ 次世代の重力波望遠鏡

高感度化 (KAGRAなど)  
→ より多くの銀河をカバーする

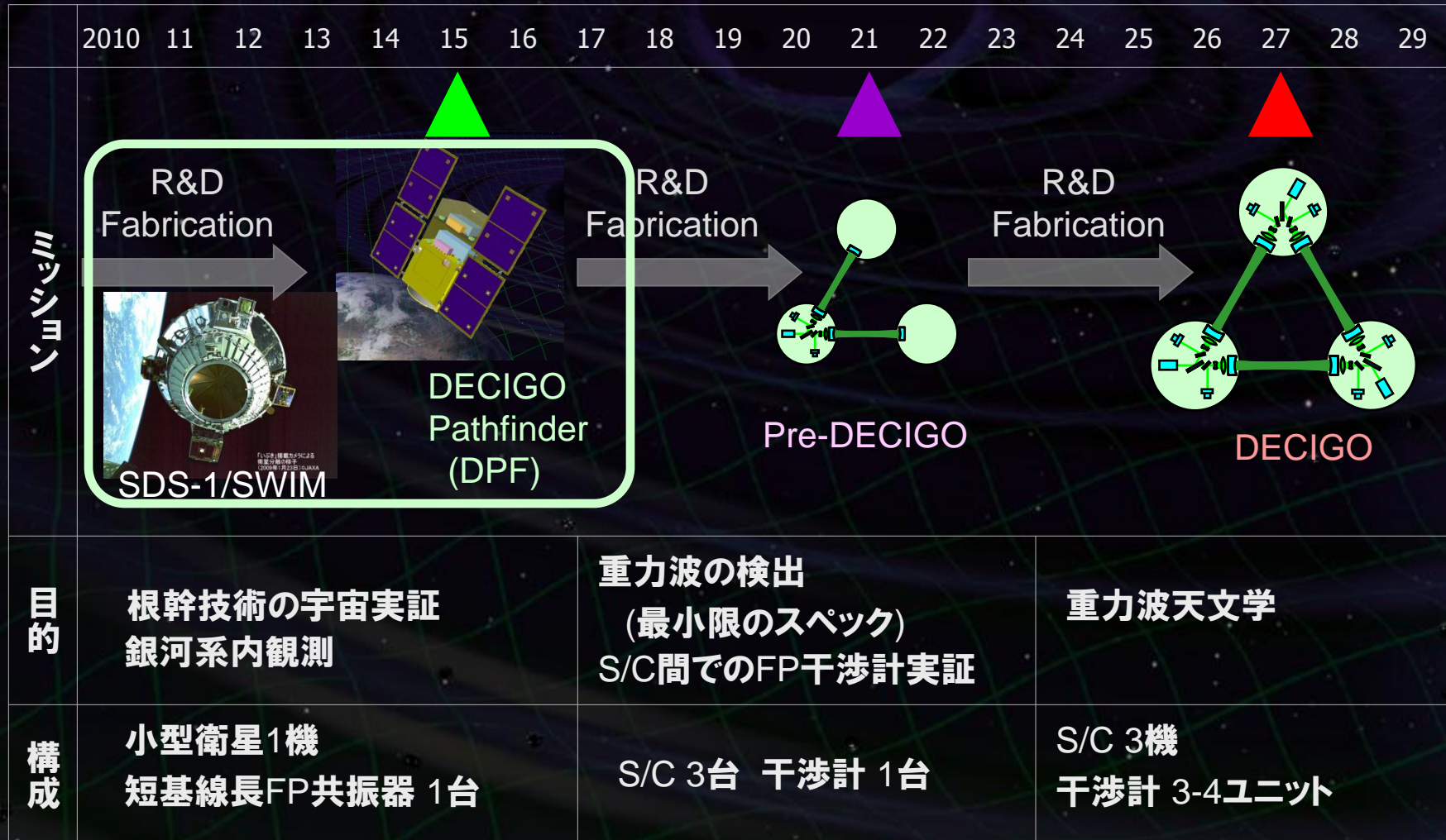


観測帯域を広げる (LISA/DECIGO)  
→ 定常的・大振幅の重力波



# DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura

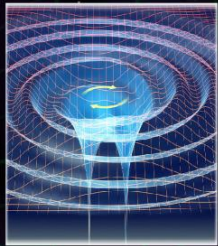




# DPFの目指す科学的成果

## 宇宙・地球の観測

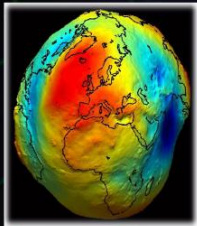
### 重力波観測



銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体現象を観測。

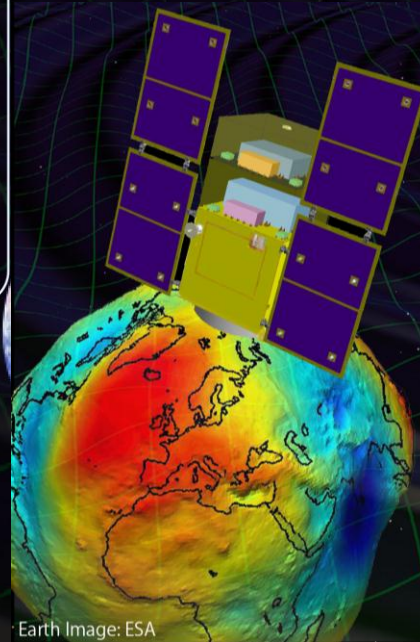
⇒ 銀河形成への知見

### 地球重力場観測



1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。

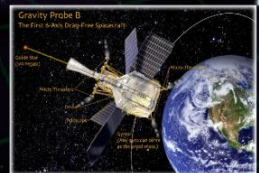
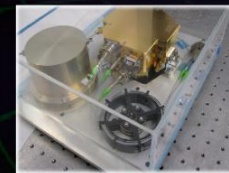
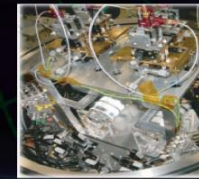
⇒ 地球環境モニタ



## 先端科学技術の確立

### 無重力精密実験プラットフォーム

- ・干渉計による精密変動計測
- ・安定化レーザー光源の実現
- ・ドラッグフリーによる低振動環境



⇒ 宇宙環境利用の新しい可能性



# 小型科学衛星シリーズ

## JAXAの小型科学衛星シリーズの候補

標準衛星バス + 次期固体ロケットを利用して  
最低 3機の小型科学衛星 を打ち上げる計画

1号機 SPRINT-A/EXCEED (~2013年)

UV望遠鏡による惑星観測

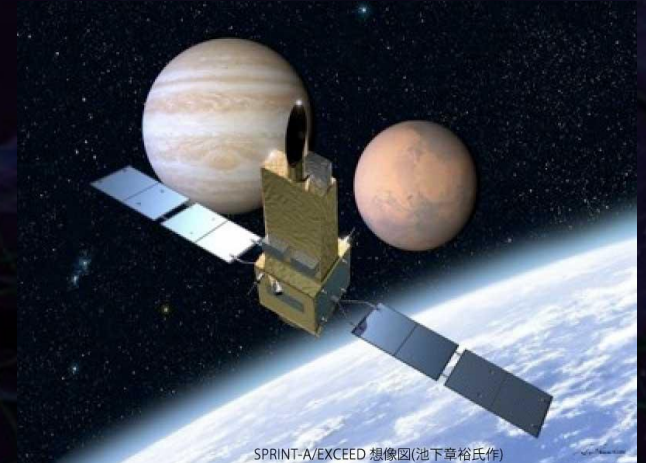
2号機 SPRINT-B/ERG (~2015年)

地球周辺の磁気圏観測



DPF: 小型科学衛星3号機 を目指す  
宇宙分野における新しいサイエンスの  
可能性として評価を受けている

打ち上げ目標： 2016/17年度



小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



Next-generation  
Solid rocket booster (M-V FO)  
Fig. by JAXA



# 研究活動の方針

## ・重力波分野においてKAGRAの成功が第1優先課題

⇒ 主要推進機関の1つとして推進.

- プロジェクト全体の推進.
- 担当サブシステムの開発・評価試験.
- 理論・データ解析を通じての天文学の創成.

## ・最先端技術の基礎研究開発(TOBA, DPF, 低温)も重要

⇒ 研究成果の創出・人材の育成と重力波分野の継続的発展.

- 自由な発想に基づく, 挑戦的で新しい科学的価値の創造.
- KAGRA以外の独自性のある研究成果と実績の蓄積.
- 将来に渡る先進的な研究拠点としての魅力.

研究活動のバランスを取りつつ進める.

# 教育への抱負



# これまでの教育活動

- 1999 - 2008 : **東京大学 物理学教室 (助手/助教)**
  - 学部3,4年生の実験指導, 大学院学生の指導
  - 指導学生の主な受賞
    - \* 物理学会 若手奨励賞 (2006年度 沼田, 2011年度石徹白).
    - \* 東京大学 奨励賞 (2008年度 穀山).
    - \* GWIC Thesis Prize (2006年 麻生), 国際会議ポスター賞 (2010年 正田).
  - 博士論文 7編, 修士論文 17編, 卒業論文 38編
- 2009 - 2012 : **京都大学 物理第二教室 (特定准教授)**
  - 天体核研究室(宇宙理論)に所属
    - ゼミを通して学生と大学院学生を指導.
    - 重力波源の理論, 数値相対論  $\leftrightarrow$  観測, データ解析
  - 集中講義 3回, 海外集中講義 1回
- 2012 - : **国立天文台/総合研究大学院大学 (准教授)**
  - 受託学生の指導.

# 教育への抱負

- 大学院学生等の教育は非常に重要.
  - 次世代の研究・学問分野を担う人材育成  
→ 分野の**継続的发展**.
  - 最先端の知識・人材の**社会への還元**.



- 魅力的な研究テーマに対する**主体的な研究**  
(自由な発想の研究 ⇔ 研究室ノウハウの積み上げ)
- 個々の**適正** (プロジェクト研究 ⇔ 小規模実験)
- 学生への**信頼と忍耐**.

自ら成長することも含めて教育にも励みたい



# まとめ

# まとめ

## ・研究実績

さまざまな研究段階・切り口・立場で成果を挙げてきた。

- 干渉計など観測機器開発 / 観測データを用いた重力波探査解析
- 実験室での小規模研究 / 大型プロジェクトの遂行
- 新しい発想に基づく基礎研究 / 組織的・実践的な研究開発

⇒ **重力波研究分野を牽引してきた。**

## ・研究計画

重力波研究拠点として、魅力ある研究を継続する。

- KAGRA計画の推進
- 天文現象およびデータ解析手法の研究
- 基礎開発, 基礎物理研究

⇒ **重力波天文学の創成と継続的発展,  
物理学・宇宙物理学への貢献を目指す。**

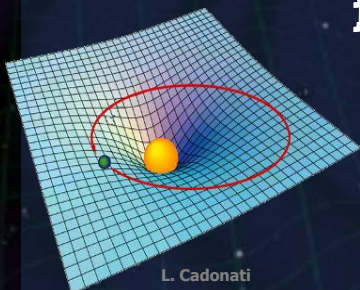


終わり

# 重力と重力波

## 一般相対性理論

重力を時空の性質と解釈



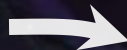
アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の歪み

質量  
(エネルギー・運動量)

変動成分



## 重力波

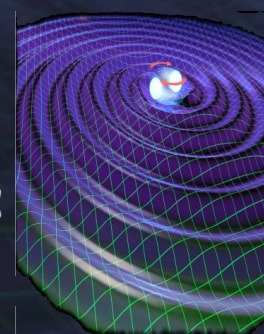
重力波天文学

宇宙を探る新しい目

激しい天体現象の中心部

誕生直後の宇宙の姿

一般相対性理論の検証



定常成分



## 重力

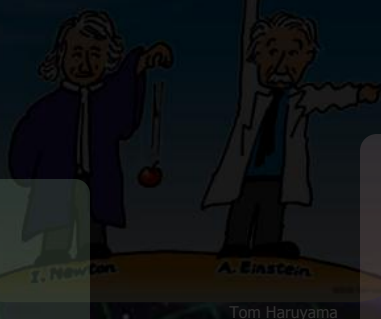
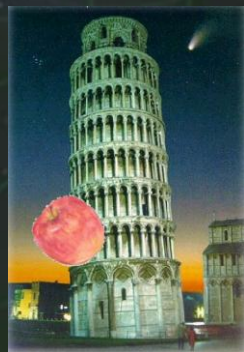
時空の成り立ちを探る

現代物理学の諸問題への知見

高次元時空, 重力子の振る舞い

基礎物理法則に対する知見

重力の逆二乗則, 等価原理



Tom Haruyama

観測



## 微小変動測定

マクロな系の微小変動計測

レーザー干渉計

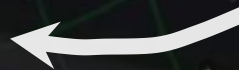
量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧

熱雑音, 地面振動

信号処理

測定





# TAMA300 と CLIO

## TAMA300 (1995~)

基線長300mの 重力波検出器

銀河系内を見渡せる感度  
(世界最高感度 2000-2002年)

他の干渉計に先駆けた観測運転  
(3000時間を超える観測データ)

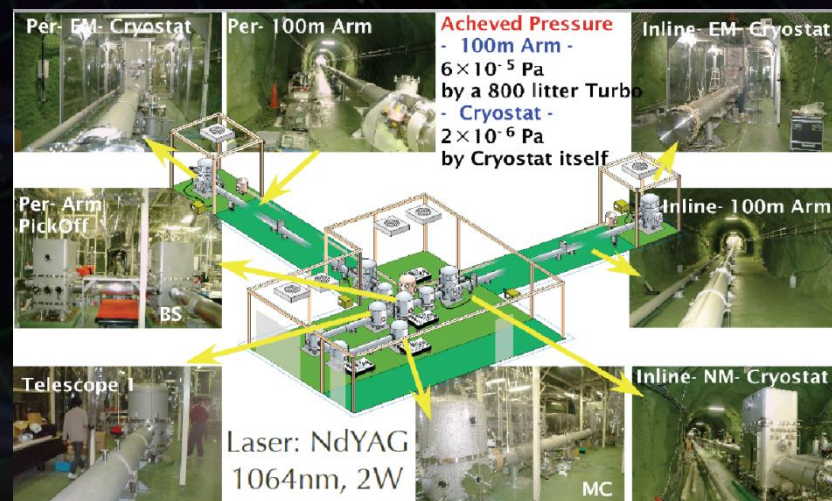


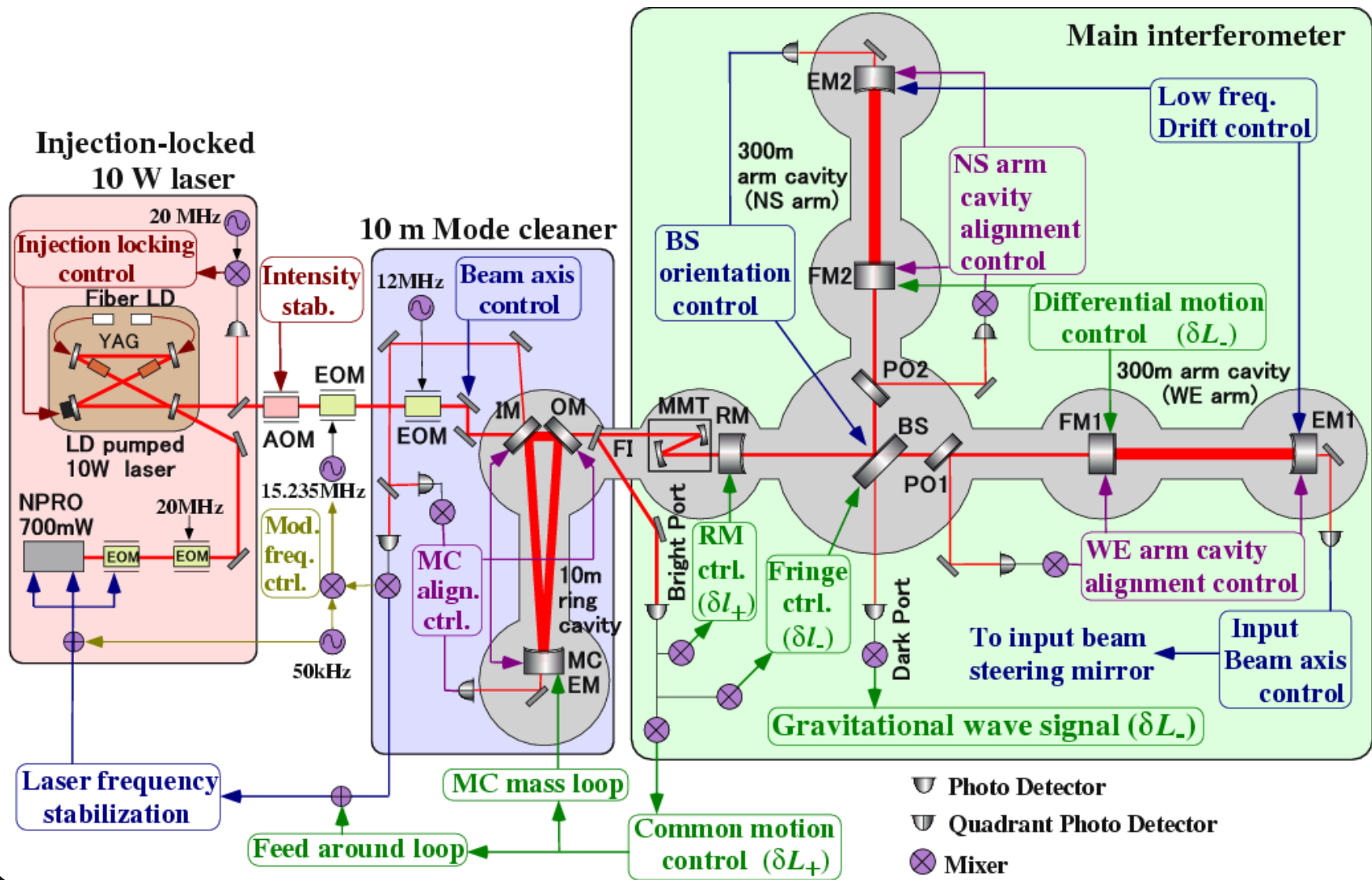
## CLIO (2002~)

基線長100mの  
低温・地下レーザー干渉計

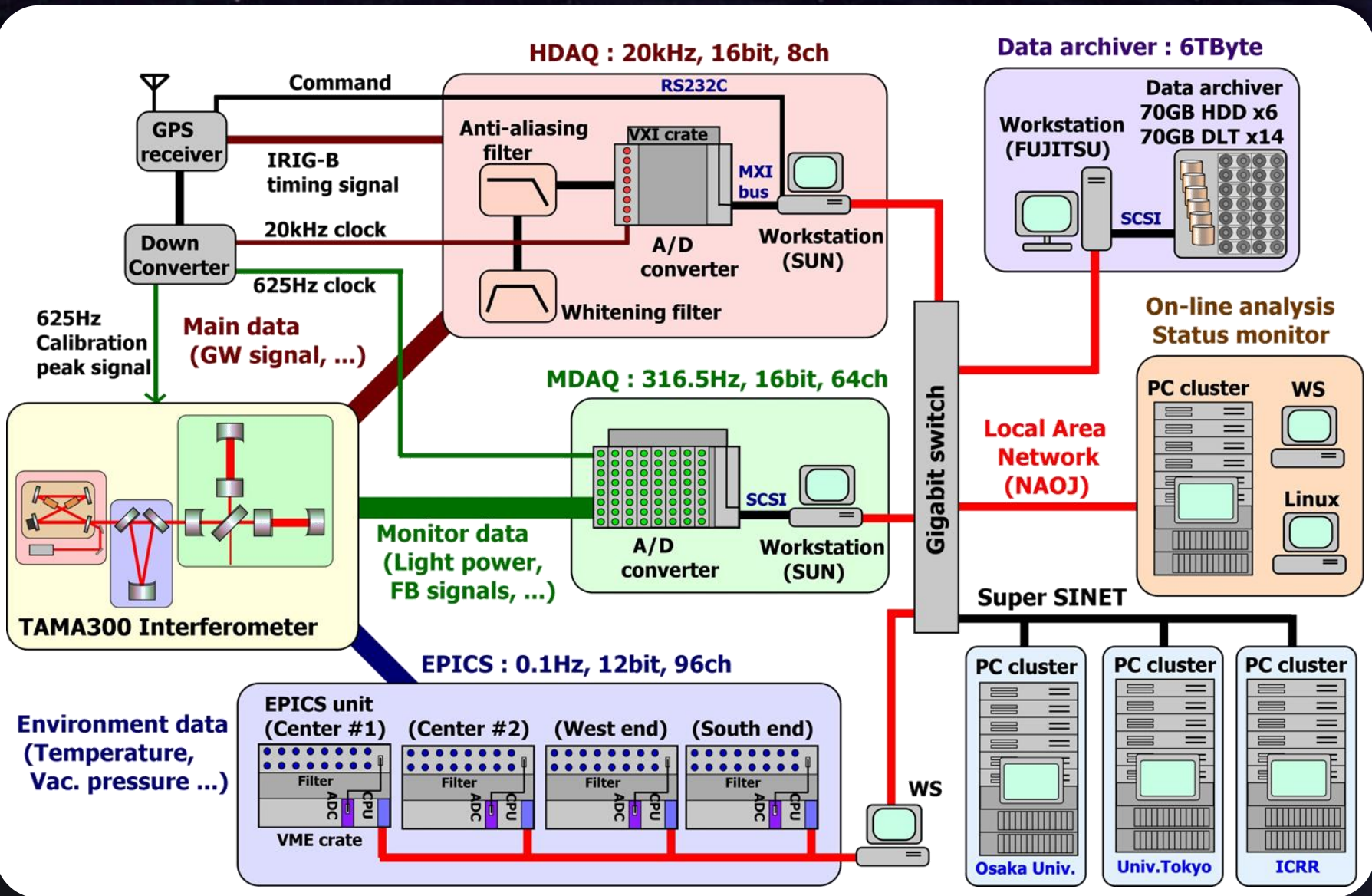
地下環境を生かした安定な動作  
20K以下の低温での動作

→ 冷却による感度向上を確認









Data Taking		Objective	Observation time	Typical strain noise level	Total data (Longest lock)
DT1	August, 1999	Calibration test	1 night	$3 \times 10^{-19}$ /Hz <sup>1/2</sup>	10 hours (7.7 hours)
DT2	September, 1999	First Observation run	3 nights	$3 \times 10^{-20}$ /Hz <sup>1/2</sup>	31 hours
DT3	April, 2000	Observation with improved sensitivity	3 nights	$1 \times 10^{-20}$ /Hz <sup>1/2</sup>	13 hours
DT4	Aug.-Sept., 2000	100 hours' observation data	2 weeks (night-time operation)	$1 \times 10^{-20}$ /Hz <sup>1/2</sup> (typical)	167 hours (12.8 hours)
DT5	March, 2001	100 hours' observation with high duty cycle	1 week (whole-day operation)	$1.7 \times 10^{-20}$ /Hz <sup>1/2</sup> (LF improvement)	111 hours
DT6	Aug.-Sept., 2001	1000 hours' observation data	50 days	$5 \times 10^{-21}$ /Hz <sup>1/2</sup>	1038 hours (22.0 hours)
DT7	Aug.-Sept., 2002	Full operation with Power recycling	2 days		25 hours
DT8	Feb.-April., 2003	1000 hours Coincidence	2 months	$3 \times 10^{-21}$ /Hz <sup>1/2</sup>	1157 hours (20.5 hours)
DT9	Nov. 2003 - Jan., 2004	Automatic operation	6 weeks	$1.5 \times 10^{-21}$ /Hz <sup>1/2</sup>	558 hours (27 hours)



# 第2世代 重力波望遠鏡

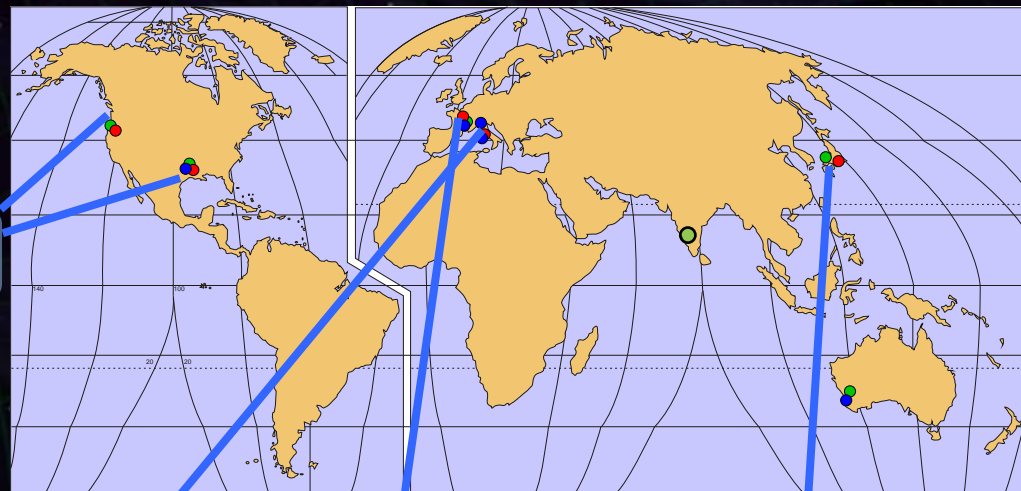
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 重力波天文学

(重力波の検出, 波源位置の特定, 波源の物理情報, ...)



aLIGO (USA)  
4km x 2 (or3)



LIGO-Australia  
in proposal

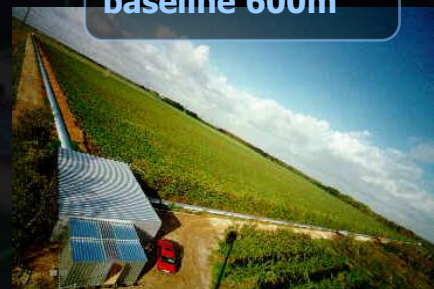


LIGO-India  
in proposal

Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m



KAGRA (JPN)  
baseline 3km

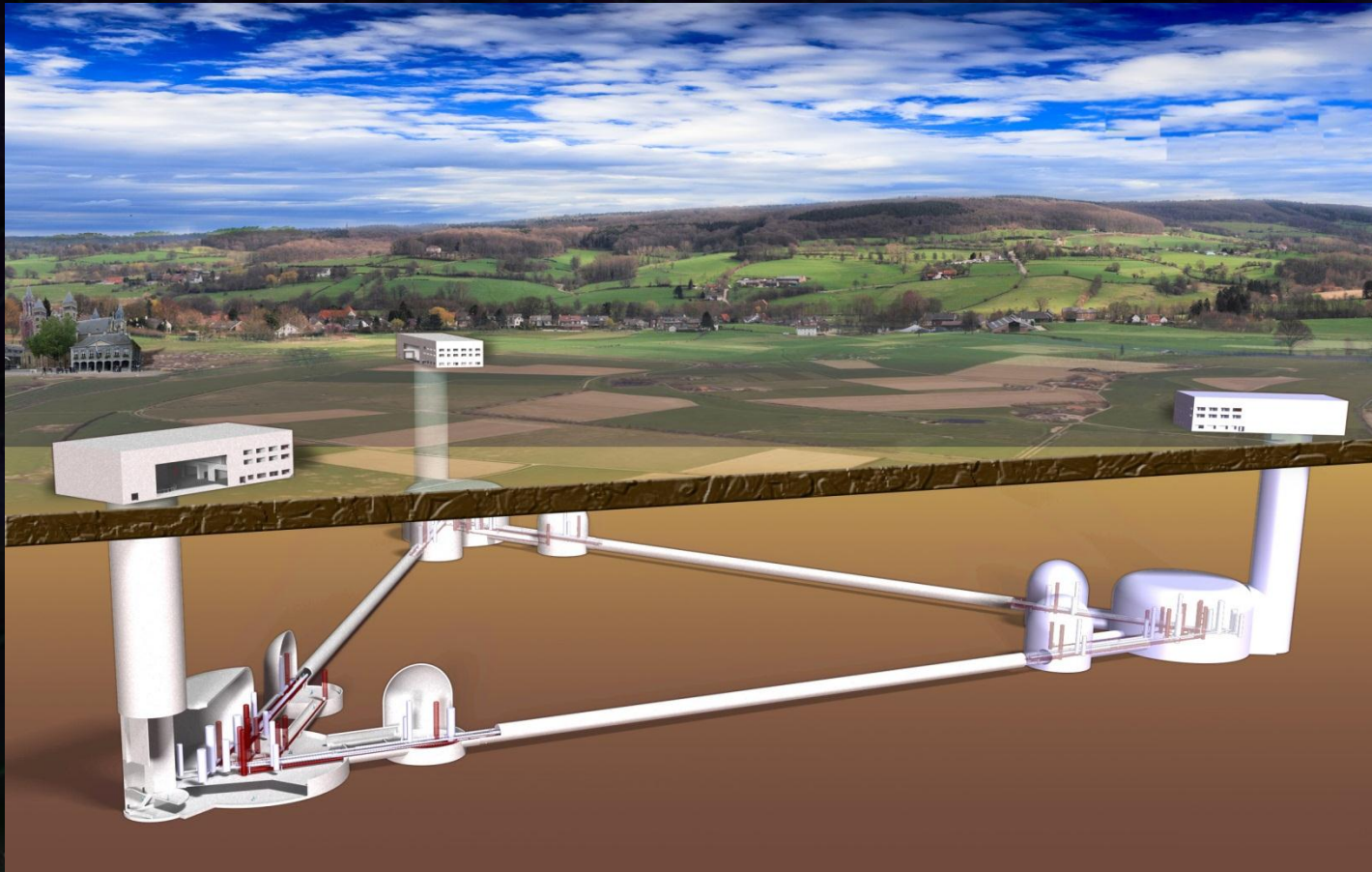




# 第3世代 重力波望遠鏡

3<sup>rd</sup>-generation detector : **ET (Einstein Telescope)**

感度：さらに一桁の改善, 2026年頃観測開始.  
長基線長 ~10km, 地下サイトに建設, 低温干渉計





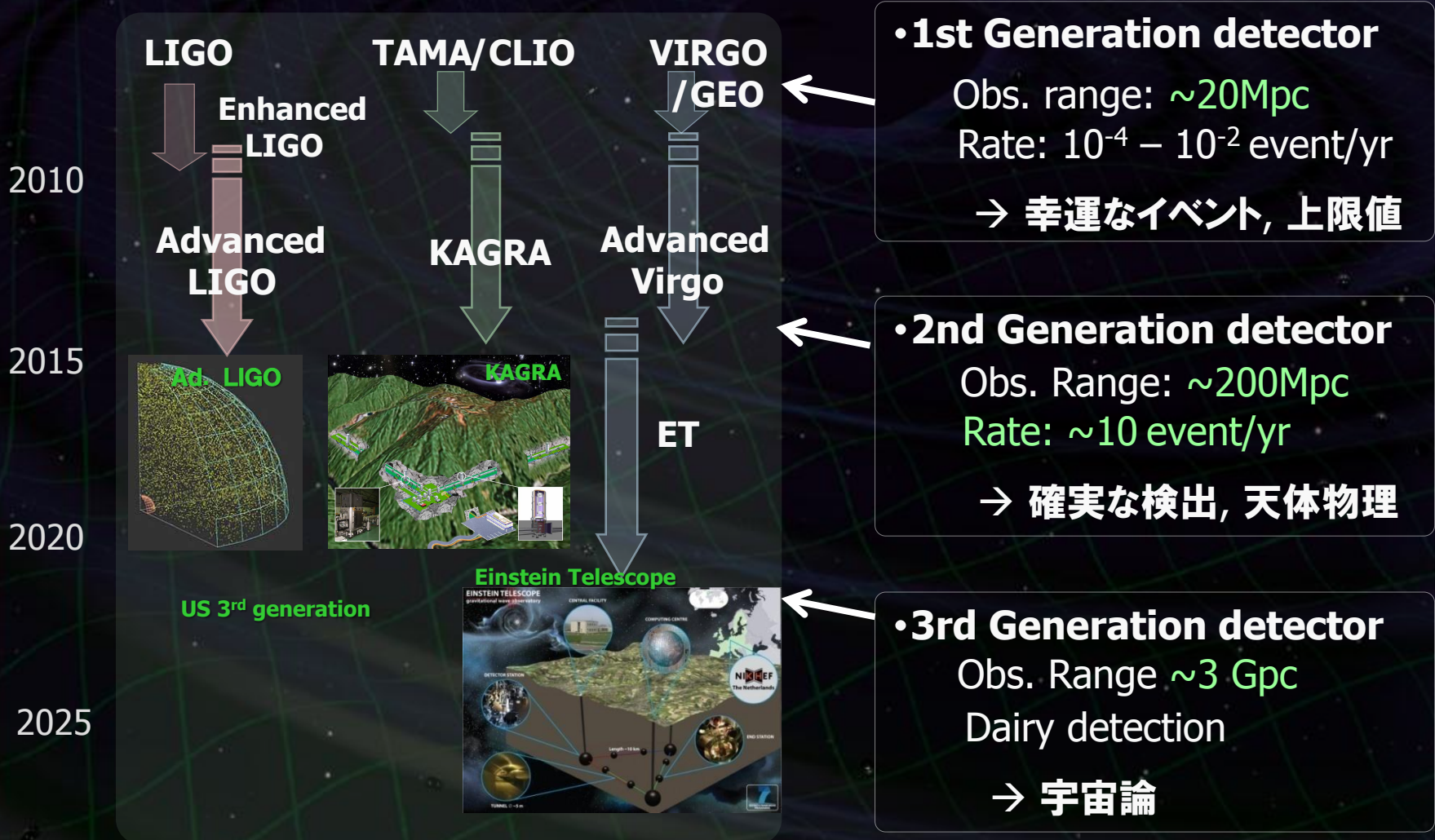
# 海外望遠鏡との比較

	2 <sup>nd</sup> -generation detectors		3 <sup>rd</sup> generation	
	aLIGO	Ad. VIRGO	KAGRA	ET
観測開始	~ 2016	~ 2016	~ 2017	~ 2026
サイト	地上 Hanford 2台 Livingstone 1台	地上 Pisa 1台	地下 Kamioka 1台	地下 3台
基線長	4 km	3 km	3 km	10 km
観測レンジ (*1)	306 Mpc	243 Mpc	273 Mpc (*2)	3 Gpc
干渉計方式	RSE広帯域	RSE狭帯域	RSE可変帯域	RSE Xylophone
熱雑音の低減	大ビーム径, 低機械損失鏡 熱レンズ効果の補正		低温化	低温化
防振系	能動防振系	受動防振系	受動防振系	受動防振系

(\*1) 連星中性子性合体现象に対する観測可能距離, 最適方向, 最適偏波, SNR>8.

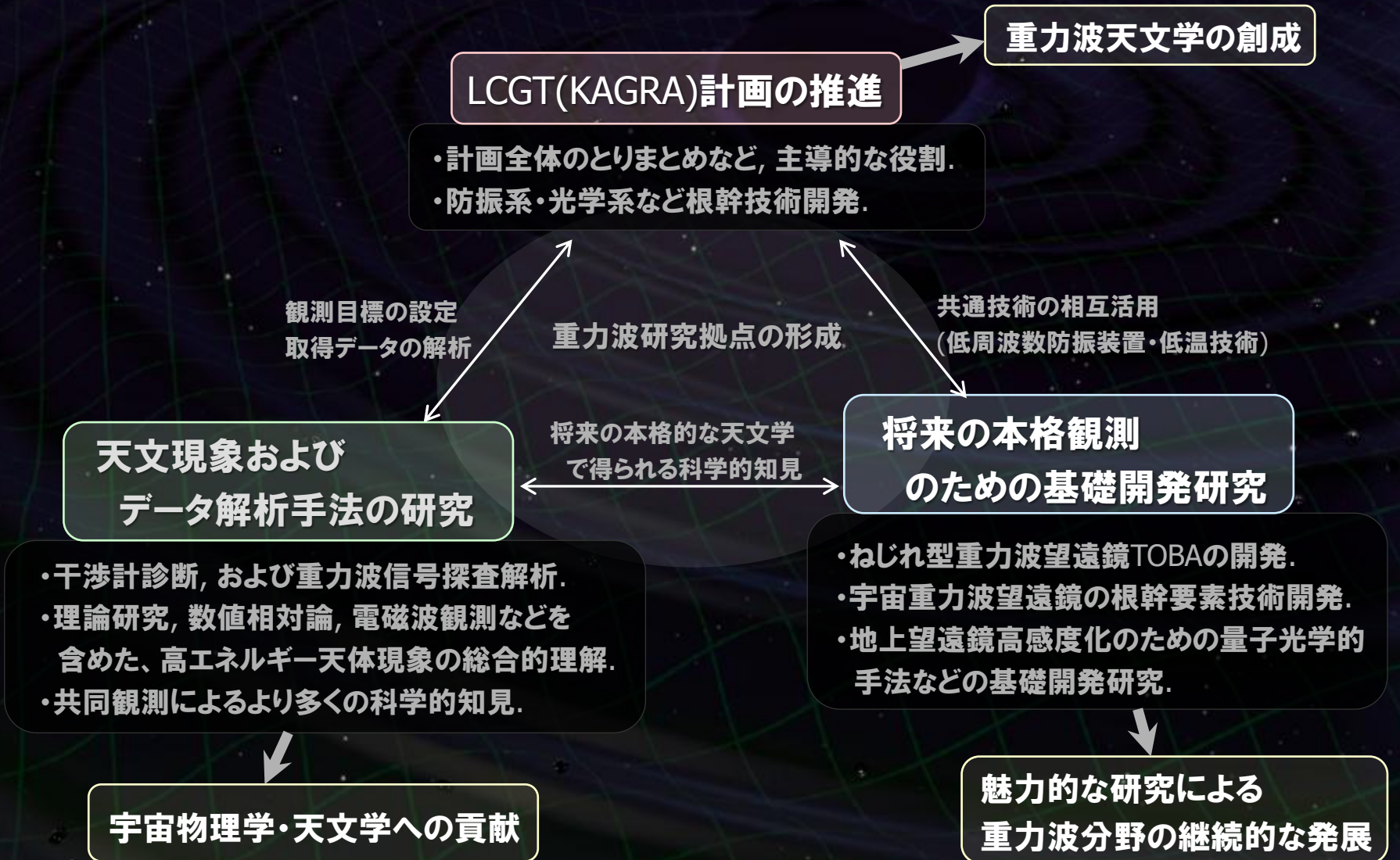
(\*2) 現在、設計の更新作業が進められており, 変更の可能性がある。

# 地上重力波望遠鏡のロードマップ





# 研究計画



# KAGRAスケジュールと予算

FY2010

FY2011

FY2012

FY2013

FY2014

FY2015

FY2016

FY2017

## 予算・主旨

最先端研究基盤整備事業  
(~98億円) → iKAGRA

科研費 特別推進研究  
(~5億円) → 人材確保・評価試験

トンネル掘削経費 (~33億円)

概算要求 (~20億円)  
→ 望遠鏡アップグレード

## KAGRA構成



Upgrade



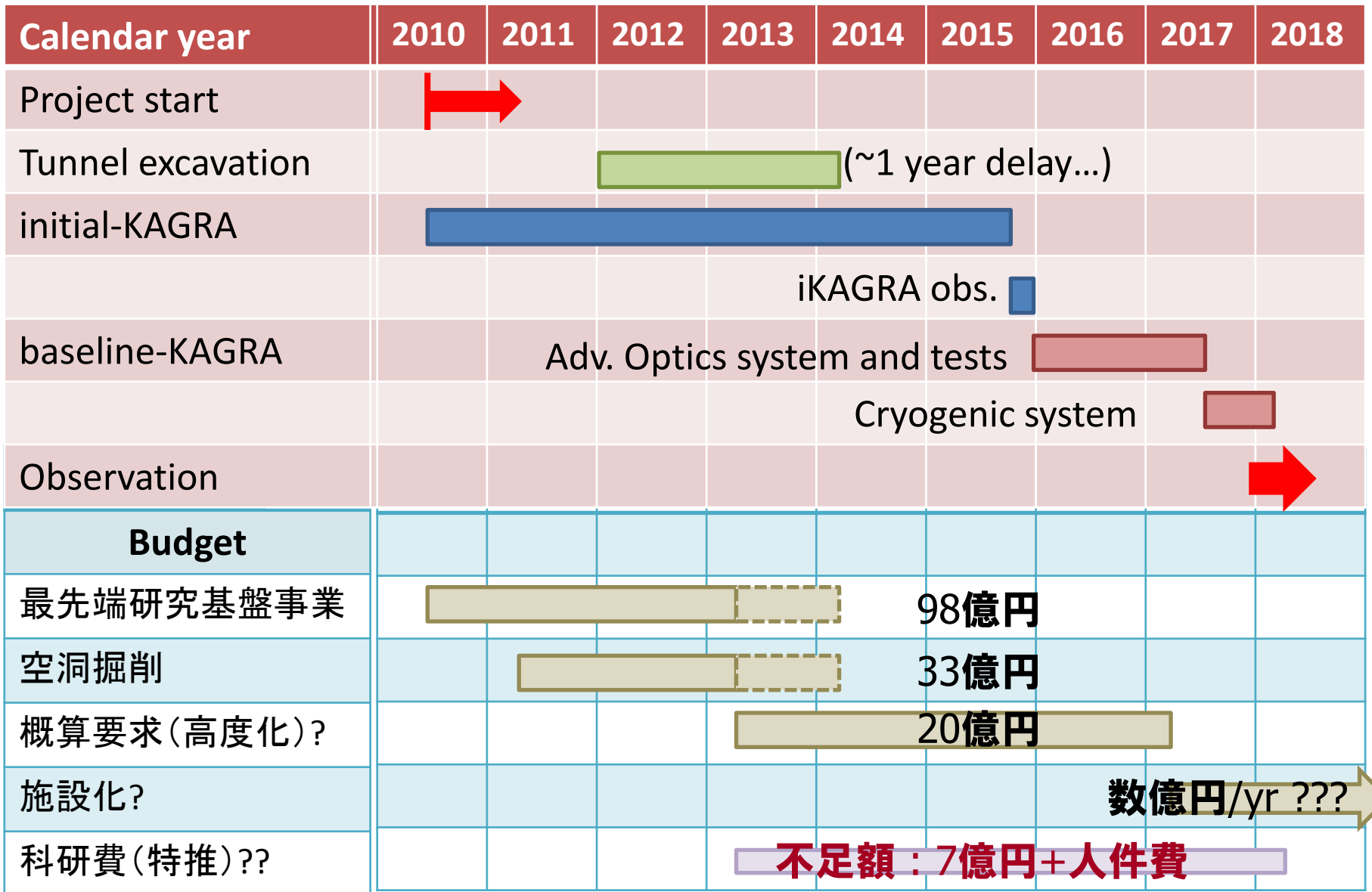
## 目標

施設・望遠鏡基盤の整備

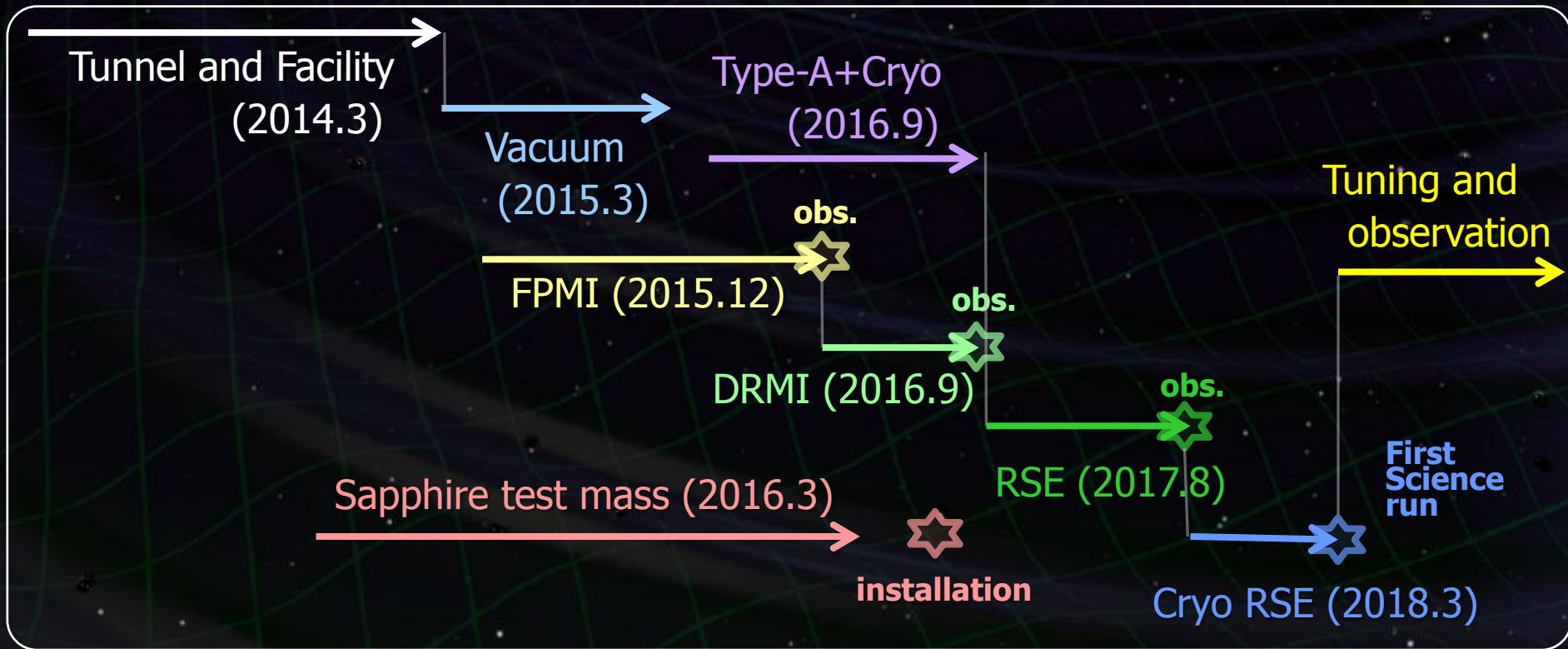
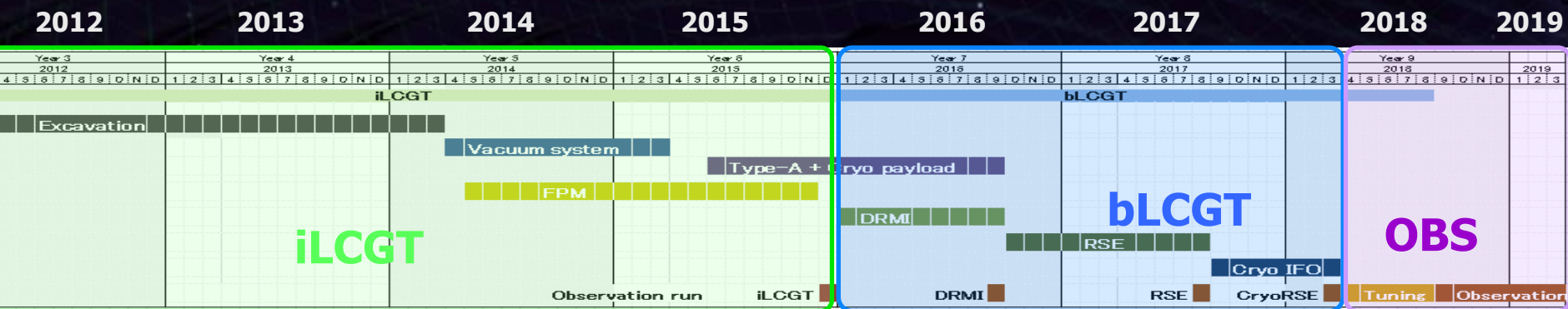
重力波の検出と天文学



# 建設スケジュール



# Major milestones of KAGRA





# LCGT(KAGRA)での研究計画

## • 全体計画推進の役割

- EC, SEOメンバーとしての役割.
- 現地作業前の評価試験などのための主要施設としての役割.

## • 防振系

- 現在の研究開発活動を継続.
- TAMA施設の一部を用いたプロトタイプ試験.

## • 光学系

- 現在は, 補助光学系サブシステムを担当.
- その他, 主干渉計・入出射光学系サブシステムに参加.

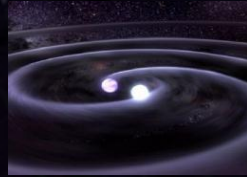
⇒ より包括的な役割を担うべき.

- 光学系全般 (主干渉計・入出射光学系・補助光学系・鏡)  
の総合的な開発, プロトタイプ試験, 事前評価試験.
- そのまま神岡サイトに移設・動作させられる完成度に.

# 重力波望遠鏡の高感度化

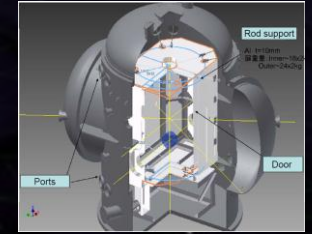
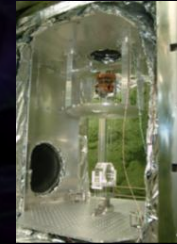
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



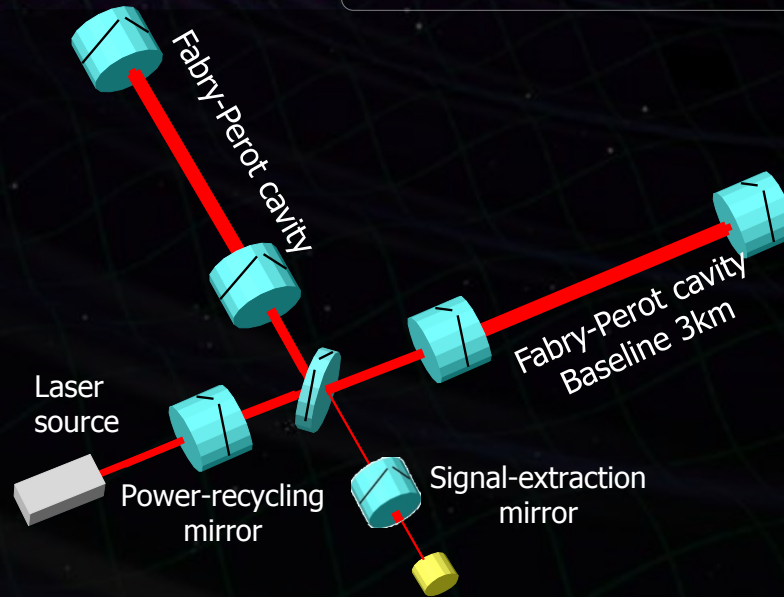
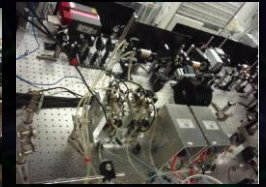
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



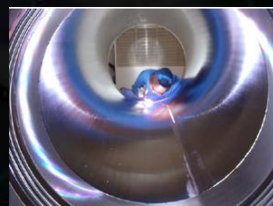
## ・光の量子雑音

大型干渉計  
干渉計方式の工夫  
高出力レーザー光源  
高性能鏡



## ・真空システム

光路長の揺らぎ  
音響雑音などの低減



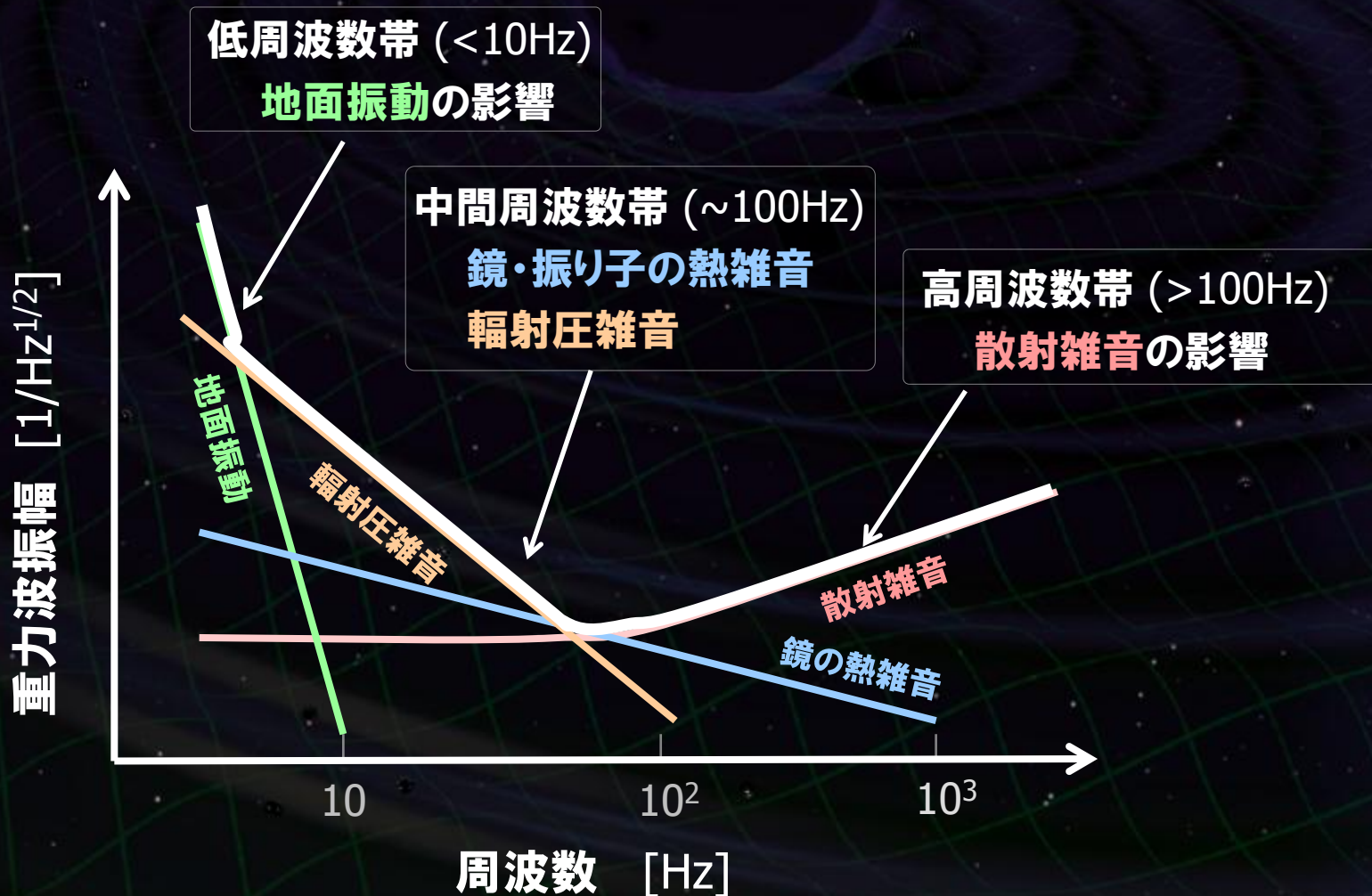
## ・長期・連続観測

デジタル制御・データ取得系  
環境モニタ, データ保管・分配





# 重力波検出器の感度

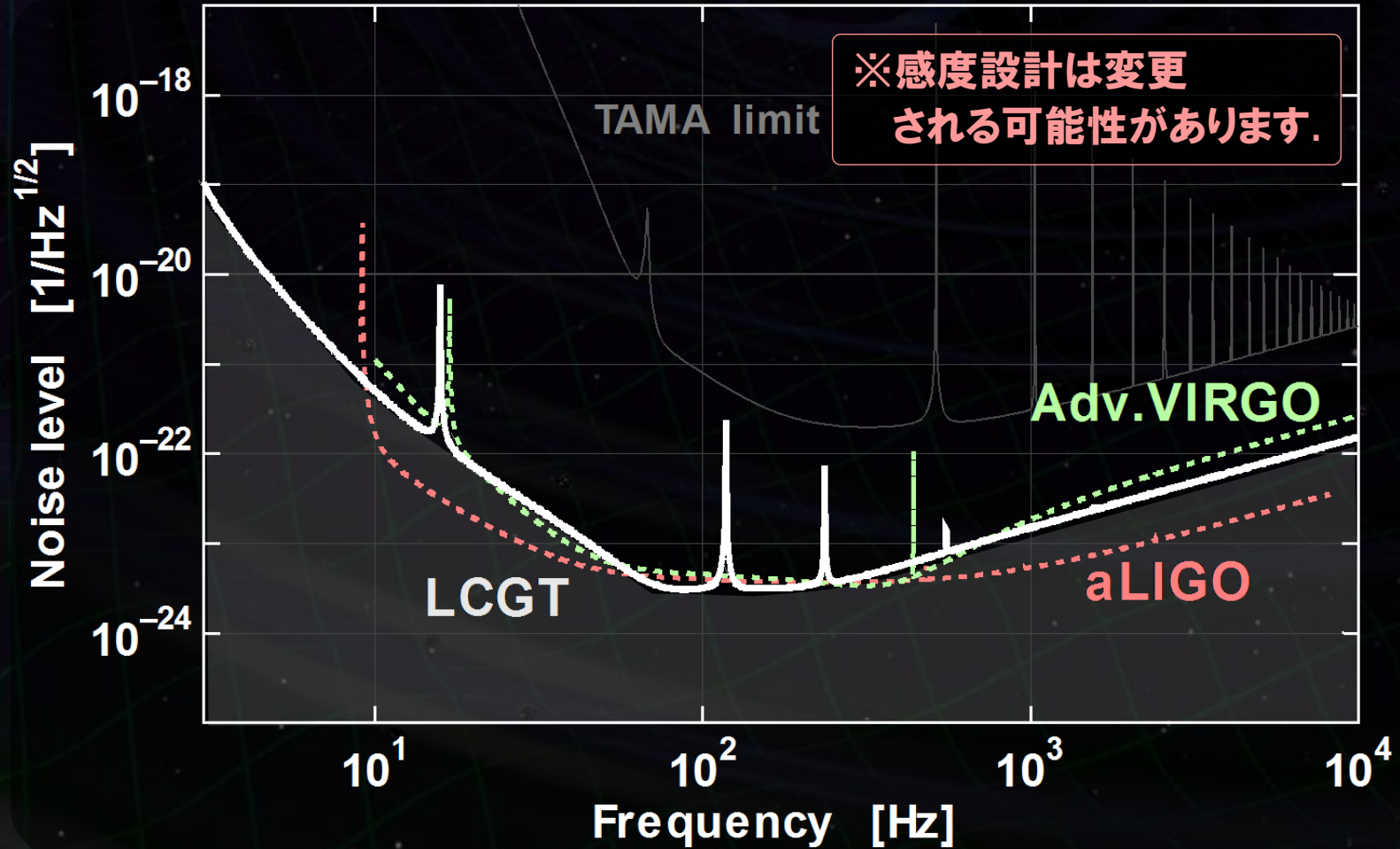


# KAGRAの感度限界

主要な雑音源で決まる限界感度  
aLIGO や Ad.VIRGOと同等



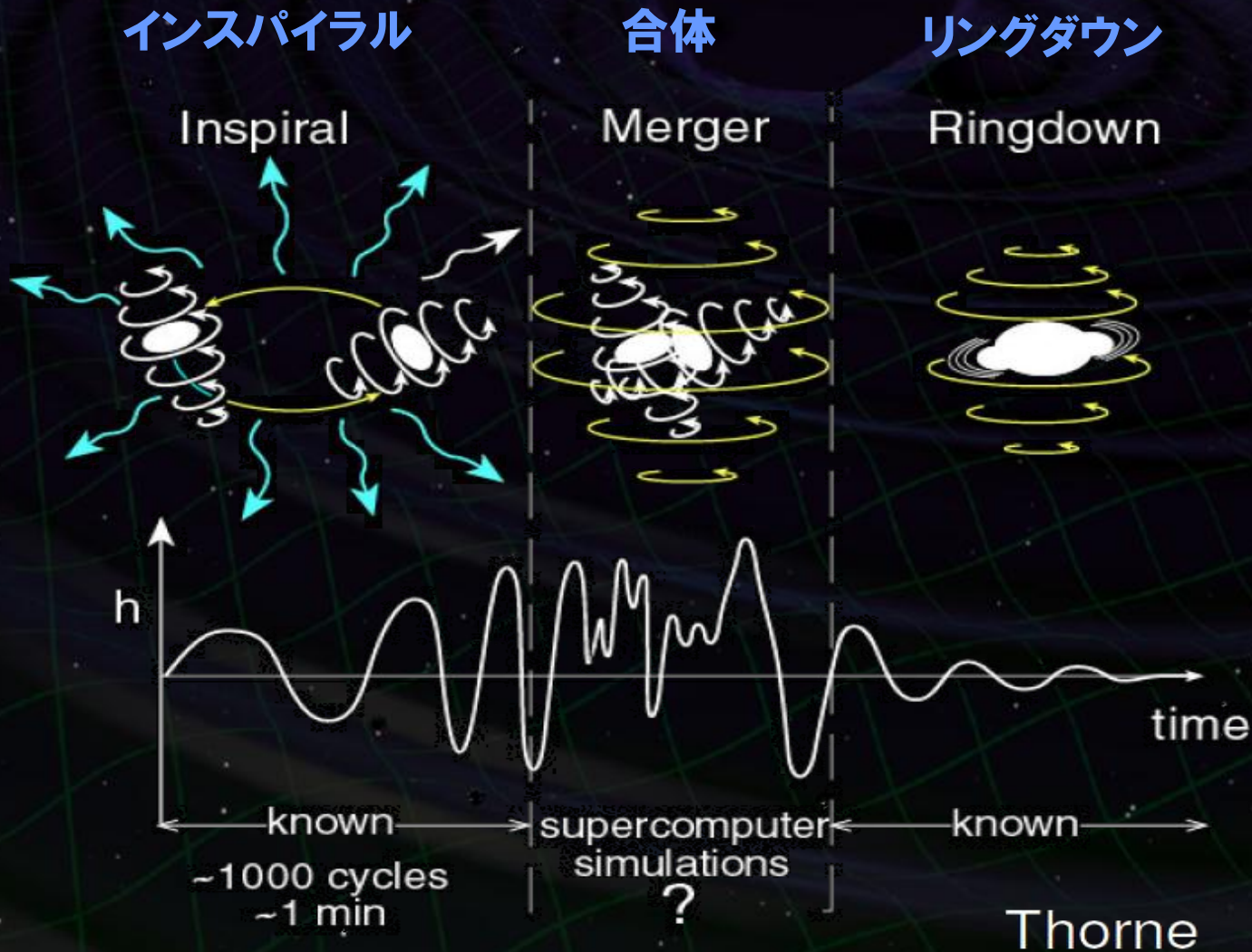
国際観測網を形成  
年間1回以上の重力波信号検出





# 連星合体現象からの重力波

- KAGRAの第一のターゲット：連星合体からの重力波



# 中性子星連星合体の数値シミュレーション

Hotokezaka+, PRD (2011)

等質量連星  
中性子星合体

遠心力によって  
 $M > M_{\max}$   
を支える中性子星

HMNS形成

Type I

BHへ崩壊

Type II  
寿命 < 5ms

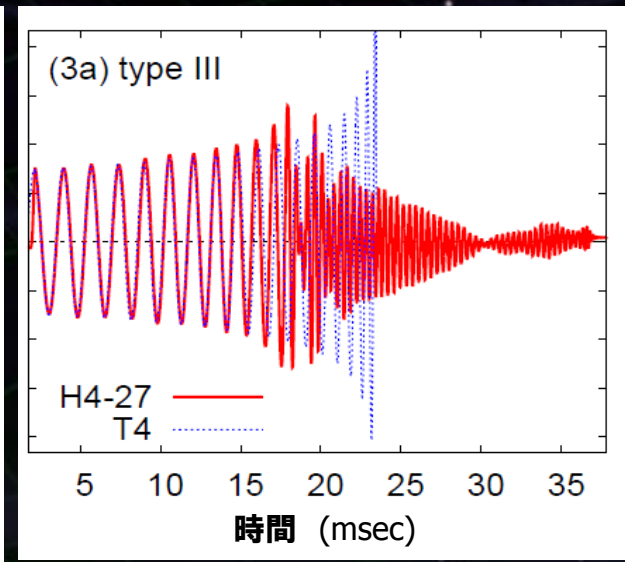
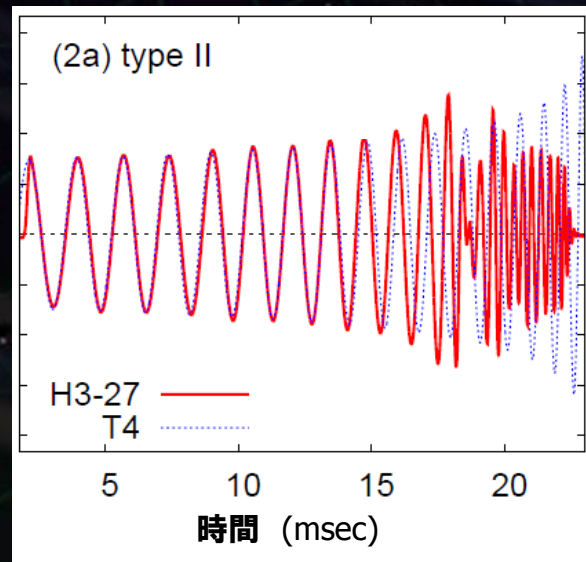
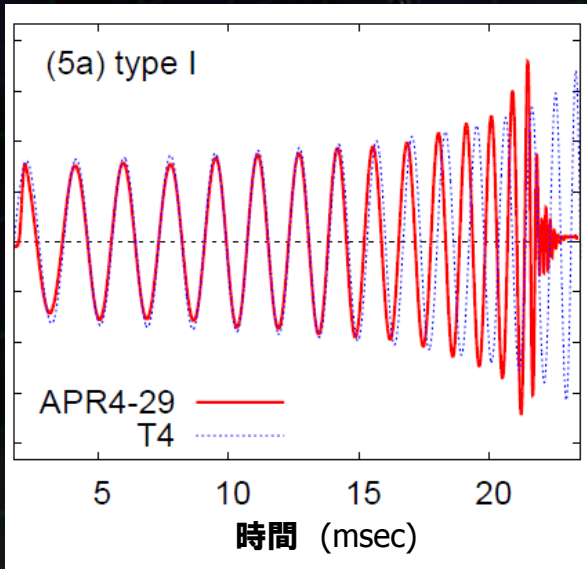
Short lived

BHへ崩壊

Type III  
寿命 > 5ms

Long lived

BHへ崩壊





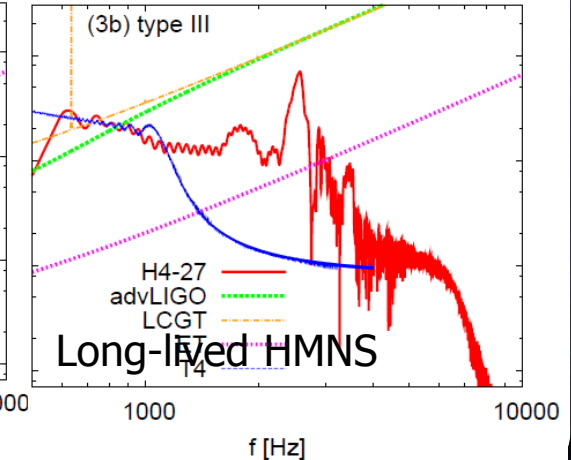
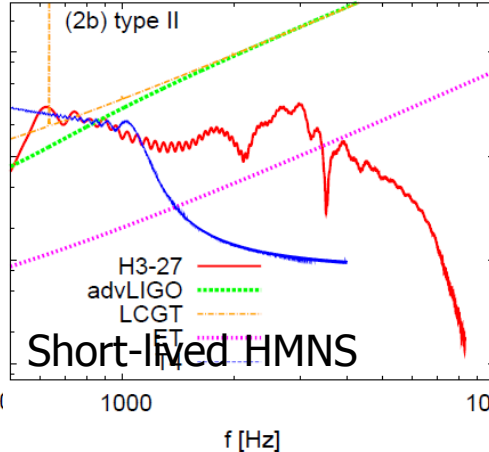
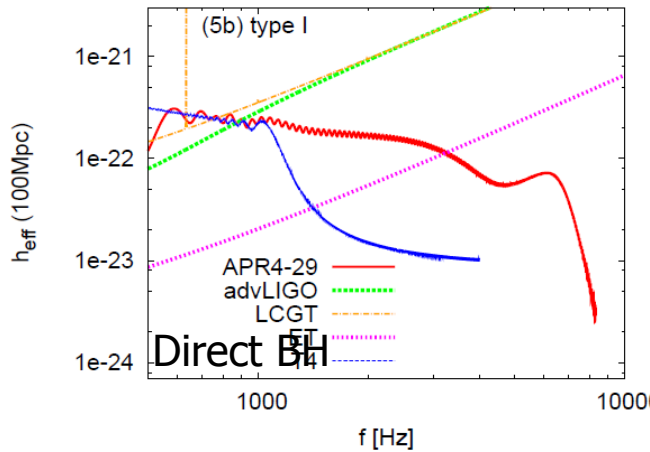
# 連星合体のスペクトル

距離100Mpc

APR4, Type I  
1.45-1.45Msun

H3, Type II  
1.35-1.35Msun

H4, Type III  
1.35-1.35Msun



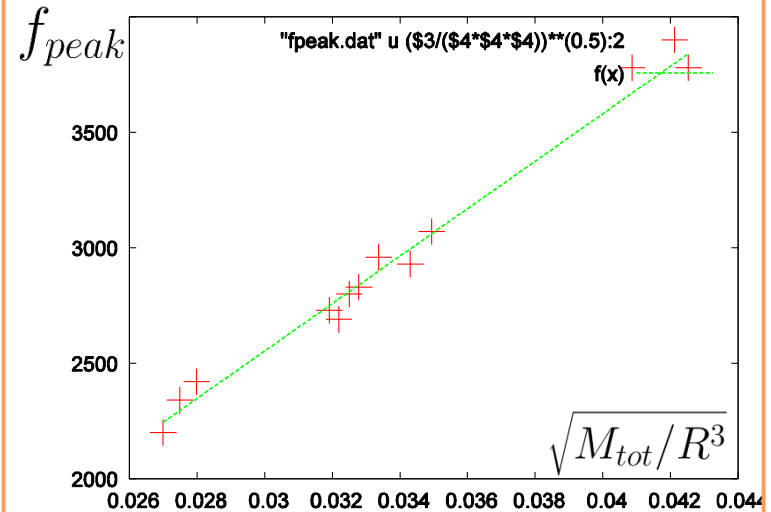
HMNSの回転周波数にピーク  
→ 中性子星の半径と相関



EOSに強い制限

Hotokezaka+, PRD (2011)

Kyutoku+, PRD (2010), Bauswein+ (2011)



# 研究計画：データ解析

## ・国際協力体制.

- KAGRA, LIGO, VIRGO間のMoUが締結見込み.
  - \* 重力波天文学に向けた技術協力.
  - \* これまでに得られたデータの共有.

19-Sep-12

## Memorandum of Understanding

between

KAGRA, LIGO and Virgo Scientific Collaborations

### A. Purpose of the agreement:

The purpose of this Memorandum of Understanding (MOU) is to establish a collaborative relationship between the signatories who are seeking to discover gravitational waves and pursue the new field of gravitational wave astronomy. The main scientific motivation is that the maximum return from gravitational wave observations is through simultaneous joint measurements by several instruments.



# 基礎研究開発について

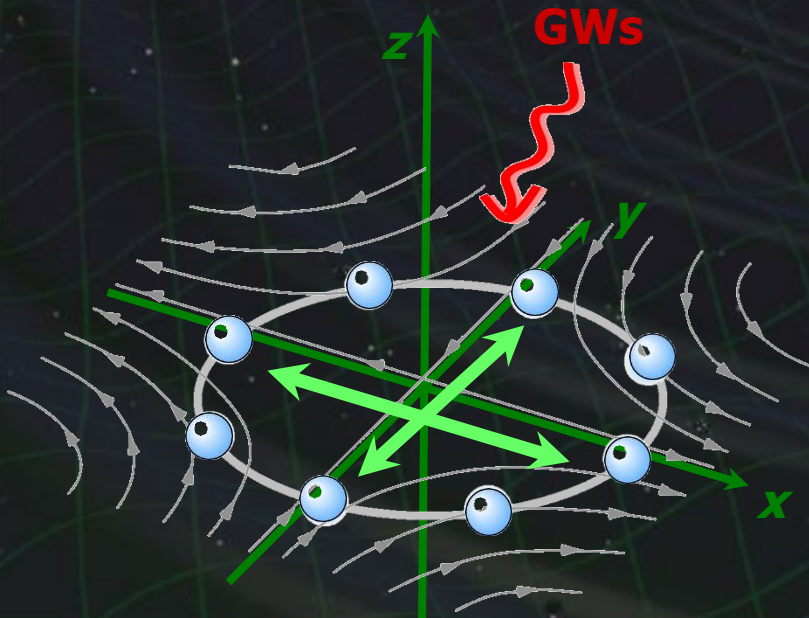
- **重力波分野においてLCGT(KAGRA)の成功が第1優先課題**
- **基礎研究開発を切り捨てるべきではない**
  - 自由な発想に基づく、挑戦的で新しい科学的価値の創造.
  - LCGT(KAGRA) 以外の研究成果と実績の蓄積.
  - 先進的な研究拠点としての魅力.

⇒ **人材の育成と重力波分野の継続的發展.**
- **リソースの配分においてはバランスが重要**
  - LCGT(KAGRA)におけるタスクと責任 / 小規模基礎研究.
  - 組織としてのテーマの選択と集中 / メンバーの研究指向性

# 歪み観測と振じれ観測

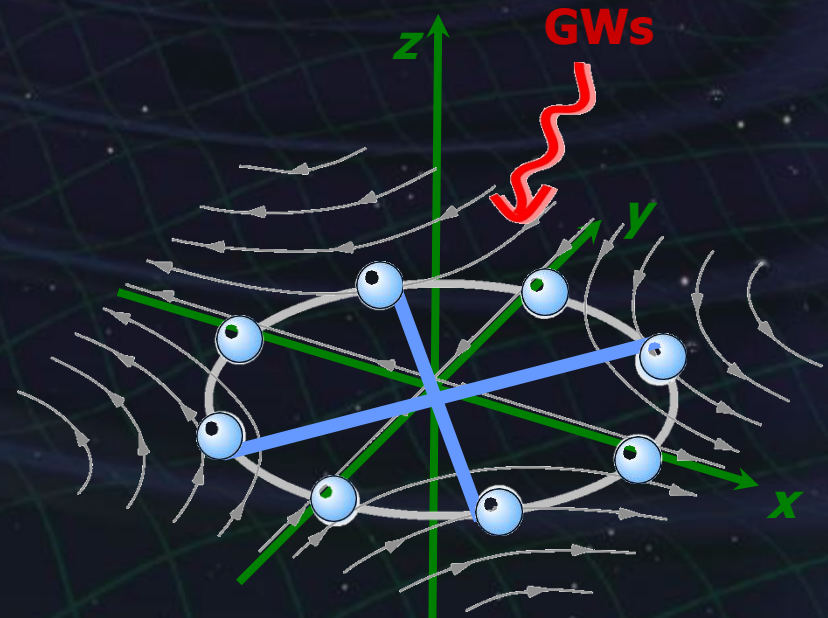
自由質点をレファレンスに、重力波による潮汐力変動を観測

Traditional IFO detector  
Detect differential length change



差動歪み変動  $h \sim \frac{\delta L}{L}$

Torsion Detector  
Detect differential rotation



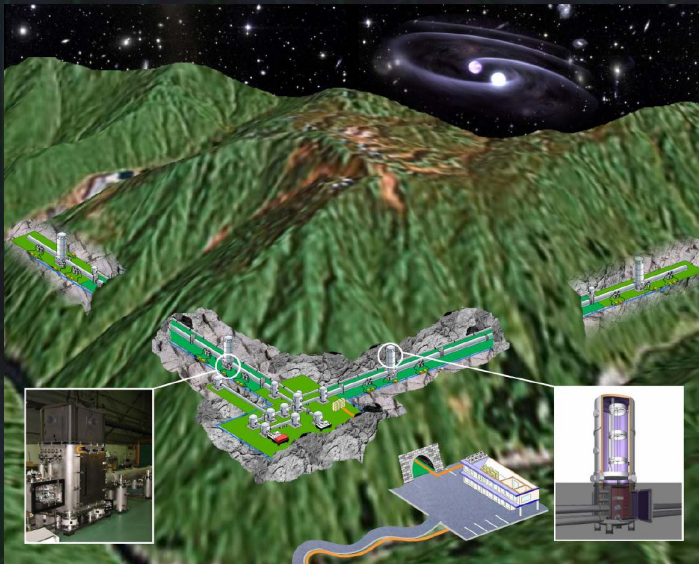
差動振じれ変動  $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$



# 方式の比較

## 歪み観測 (通常のレーザー干渉計)

試験マス間の 基線長変動  
観測周波数 10Hz-1kHz



試験マス: 振子で懸架  
(共振周波数  $\sim 1\text{Hz}$ )

長い基線長が取れる  
→ 信号の増大, 高い感度

## 振じれ観測 (TOBA)

試験マスの振じれ変動  
観測周波数 10mHz-1Hz



試験マス: 振じれ振子で懸架  
(共振周波数  $\sim 1\text{mHz}$ )

長基線は必要ない  
→ シンプルな構成, 外乱除去

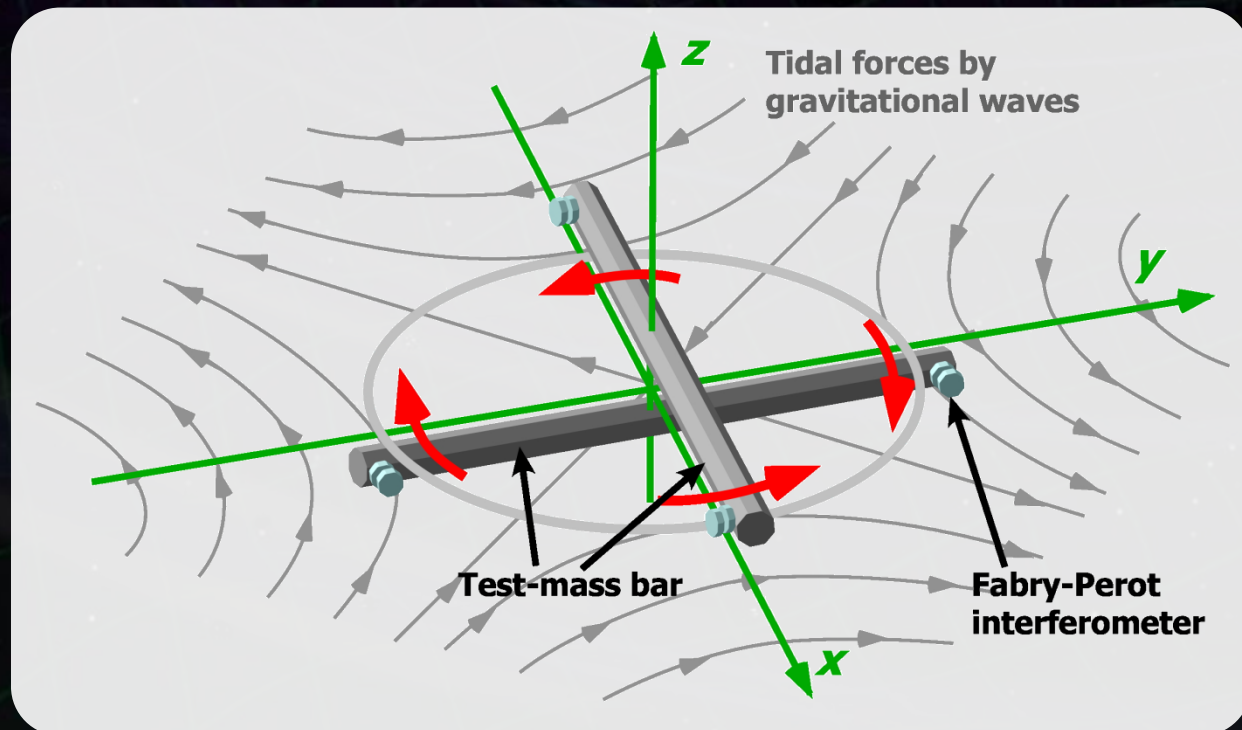
# 振じれ型アンテナ

## 振じれ型重力波望遠鏡 (TOBA: Torsion-Bar Antenna)

2つの棒状試験マスを配置  
レーザー干渉計によって  
差動回転変動を検出



地上でも低周波数重力波を観測可能.  
宇宙では、さらなる  
感度の向上が期待できる.





# TOBAの感度

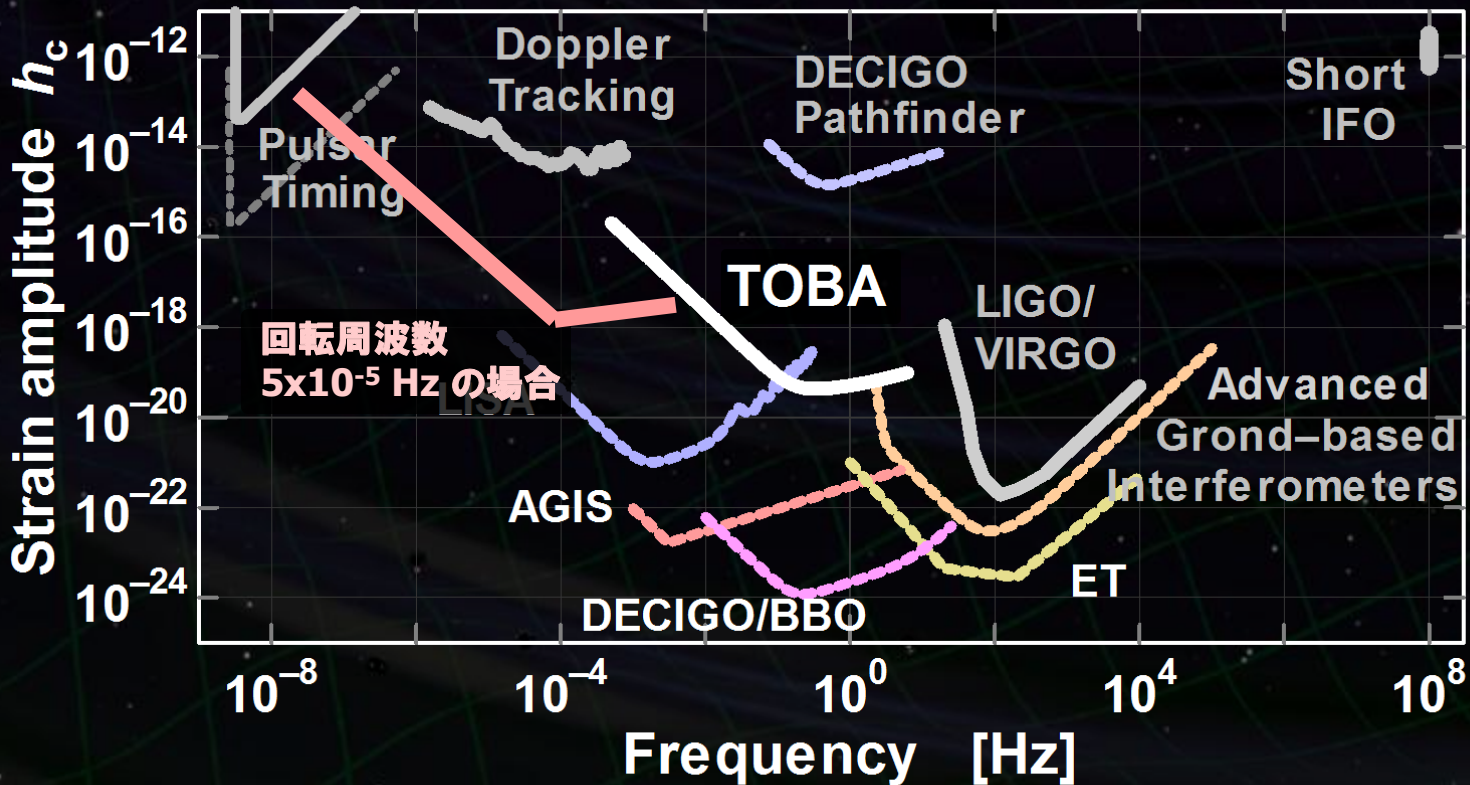
現実的なパラメータを仮定

試験質量 質量 7,600kg, 長さ 10m

レーザー光源 10W

低温動作 4K

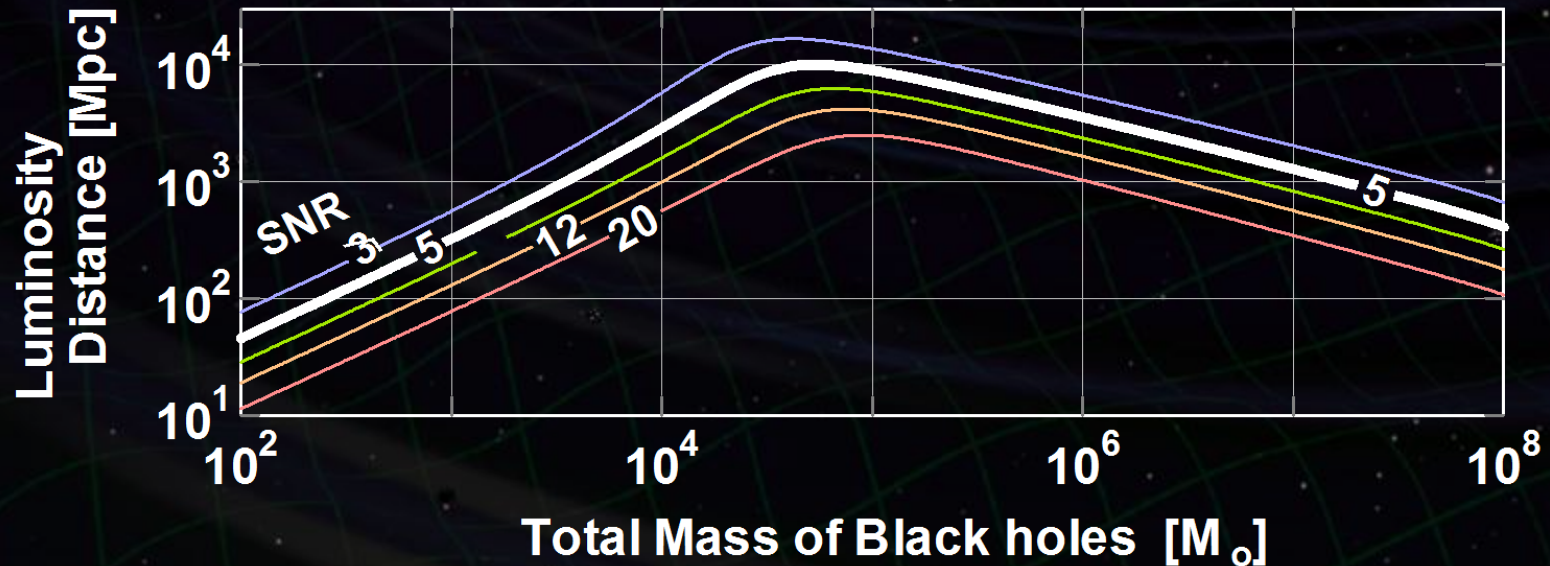
Bar length : 10m, Mass : 7600kg  
Laser source : 1064nm, 10W  
Cavity length : 1cm, Finesse : 100  
Bar Q-value :  $10^5$ , Temp: 4K  
Support Loss :  $10^{-10}$



# 観測可能距離

## ブラックホール連星の合体現象からの重力波

⇒ 10Gpcまで観測可能 ( $\sim 10^5 M_{\odot}$ , SNR = 5)



Calculation by K.Yagi



# 背景重力波

観測可能な 背景重力波の  
エネルギー密度比

$$\Omega_{\text{gw}} \sim 10^{-7}$$

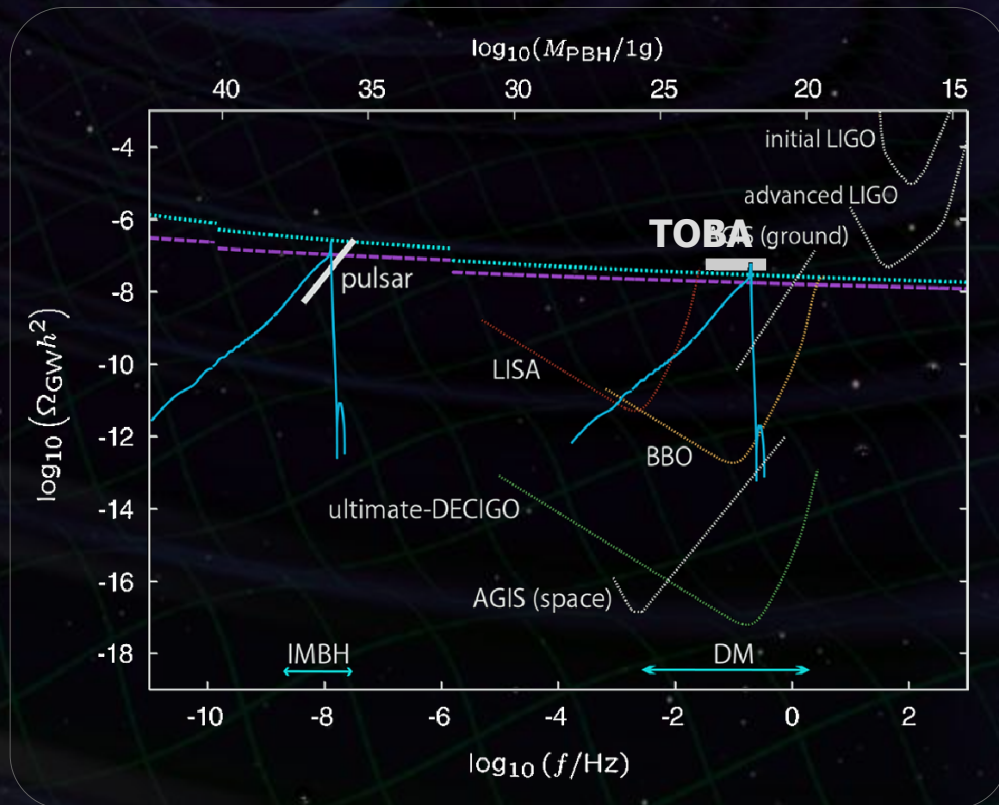
(1年間の観測)



BBN 上限値を超える

初期宇宙のテンソル  
揺らぎ起因の重力波

R.Saito and J.Yokoyama,  
PRL 102, 161101 (2009)

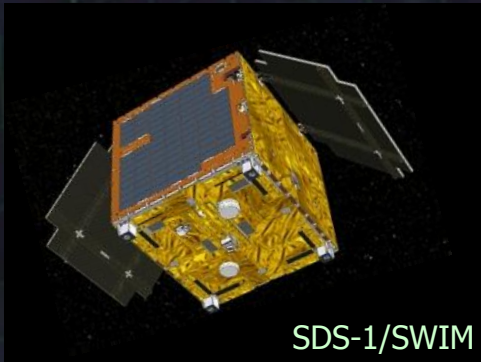


# プロトタイプ

## 2つの地上装置, 1つの衛星搭載モジュール

### ねじれ型重力波検出器A

(地球周回軌道, 2009年-)



SDS-1/SWIM

質量 50g, 長さ 5cm  
無重力浮上 + 制御  
反射型フォトセンサ  
スピン + 軌道運動

### ねじれ型重力波検出器B

(東京大学, 2008年-)



質量 150g, 長さ 20cm  
超電導磁気浮上 + 制御  
レーザー干渉計  
地上静置観測

### ねじれ型重力波検出器C

(京都大学, 2010年-)



質量 340g, 長さ 25cm  
超電導磁気浮上 + 制御  
レーザー干渉計  
地上静置観測

試験マス  
変動検出  
位置・姿勢



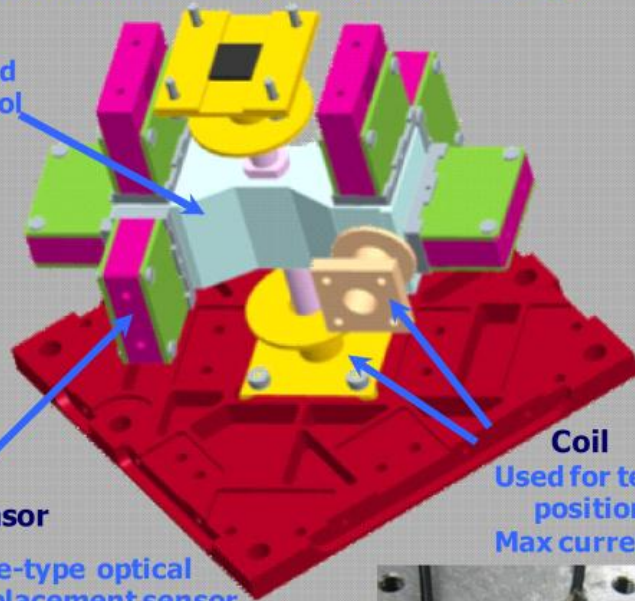
# SWIM搭載モジュール

Sensor module to demonstrate SpW communication  
Observation of gravitational waves ( $10^{-7}$  /Hz<sup>1/2</sup>)  
Monitor the satellite environment as accelerometers

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass  
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

## Test mass

~47g Aluminum, Surface polished  
Small magnets for position control

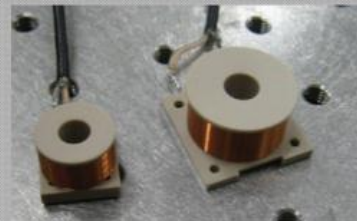


## Photo sensor

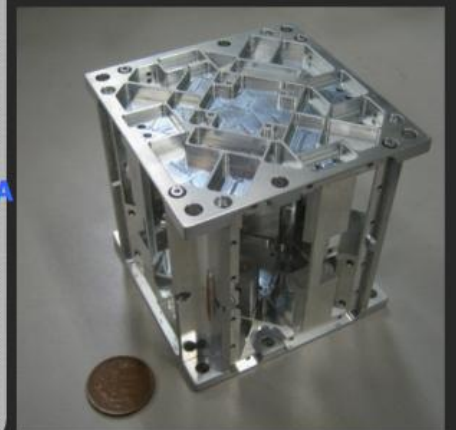
Reflective-type optical displacement sensor  
Separation to mass ~1mm  
Sensitivity ~  $10^{-9}$  m/Hz<sup>1/2</sup>  
6 PSs to monitor mass motion



Coil  
Used for test-mass position control  
Max current ~100mA



2 TAMs  
in the frame



# SWIM による観測運転

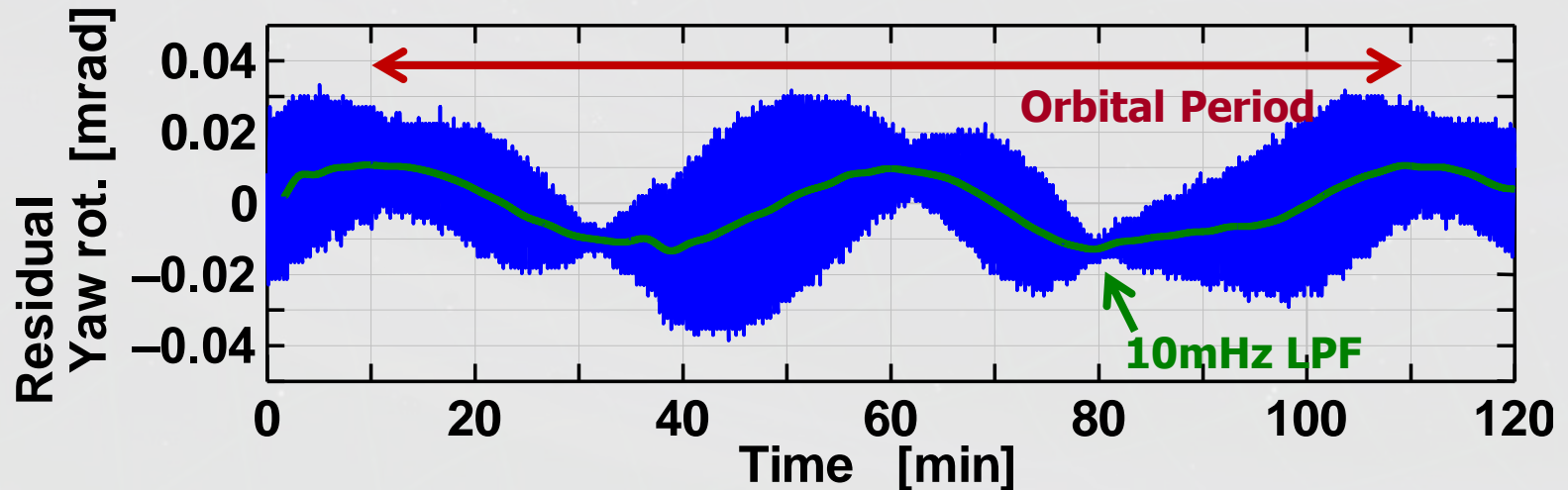
## 長時間データ取得

Jun 17, 2010 ~120 min.

July 15, 2010 ~240 min.

## 地上重力波検出器との同時観測運転

⇒ データ解析進行中

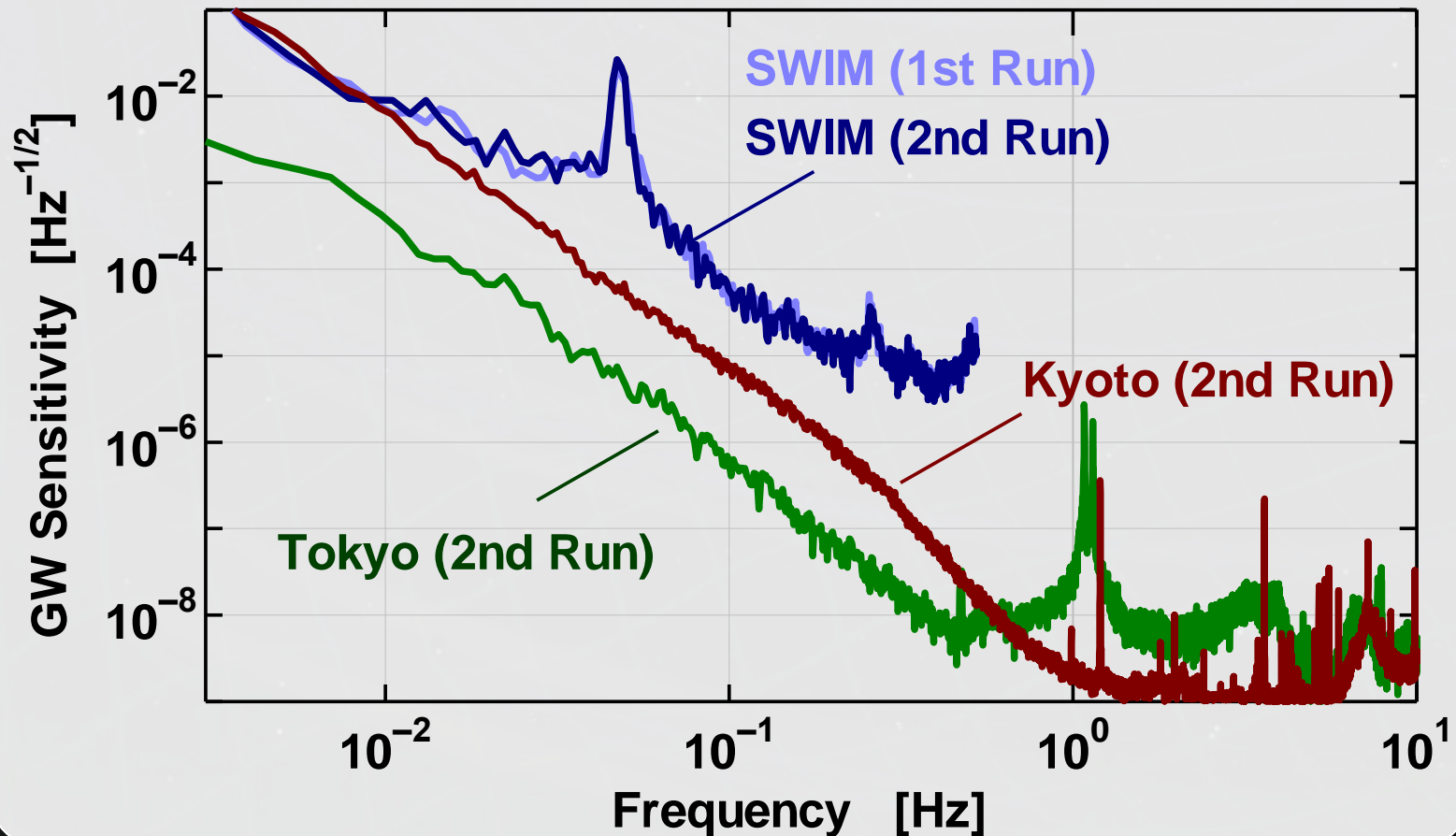




# 同時観測運転

2010年 6月17日, 7月15日

衛星搭載のSWIM と 地上装置 の同時観測

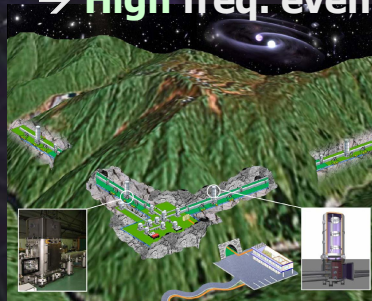


# ここまでのまとめ

**Gravity (2009~)**  
Test of gravity ISL



**LCGT (2017~)**  
Terrestrial Detector  
→ High freq. events



**DECIGO (2027~)**  
Space observatory  
→ Low freq. sources  
Cosmology



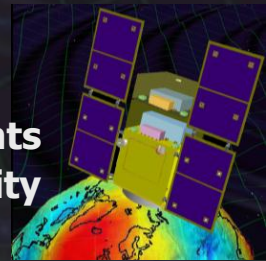
**TOBA (2005~)**  
Novel Detector configuration



振じれ振子

低周波  
数雑音

**DPF (2015~)**  
Small Satellite  
Galactic events  
Earth's gravity

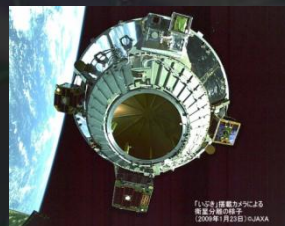


**Pre-DECIGO (2021~)**

**Satellite Gravity (?~)**  
Space observatory  
→ Earth environment



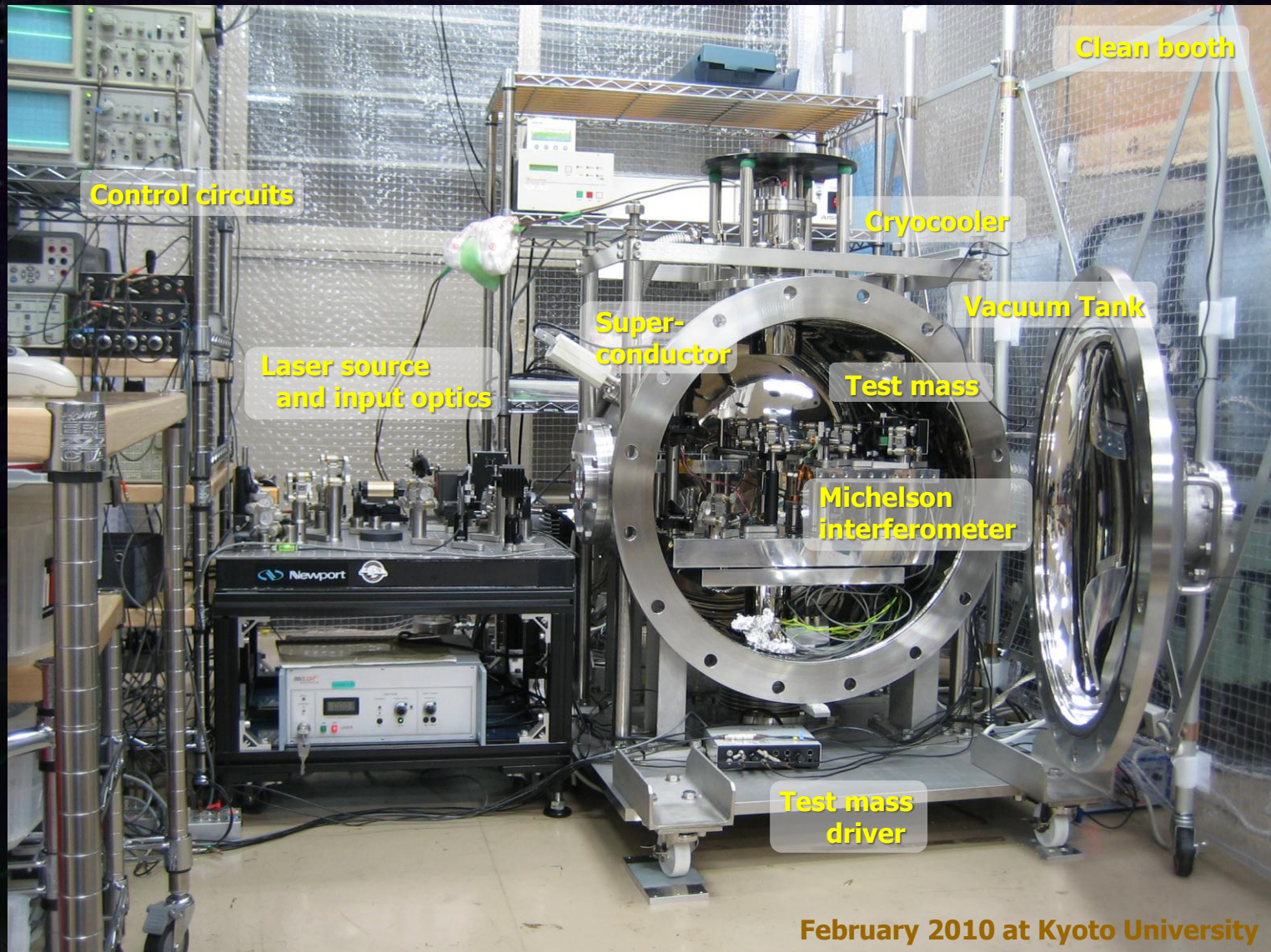
**SWIM (2009~)**  
First module in orbit



回転TOBA



# Experimental Setup





# 実験装置の全体構成

## マイケルソン干渉計

試験マス両端の差動変動 (回転) 測定  
光源: Nd:YAGレーザー  
波長 1064nm, 出力 50mW

## 超伝導体バルク

直径 600mm, 厚さ 20mm

$Gd_1Ba_2Cu_3O_{6.9}$  : 70.9%

$Gd_2Ba_1Cu_1O_7$  : 19.2%

転移温度  $\sim 92K$

## パルス管冷凍機

最低到達温度  $\sim 40K$

バルブユニット分離  $\rightarrow$  低振動化  
柔軟ヒートリンクによる防振

## 棒状ねじれ秤

長さ500mm程度

先端にテストマスを設置

ソースマス形状を工夫

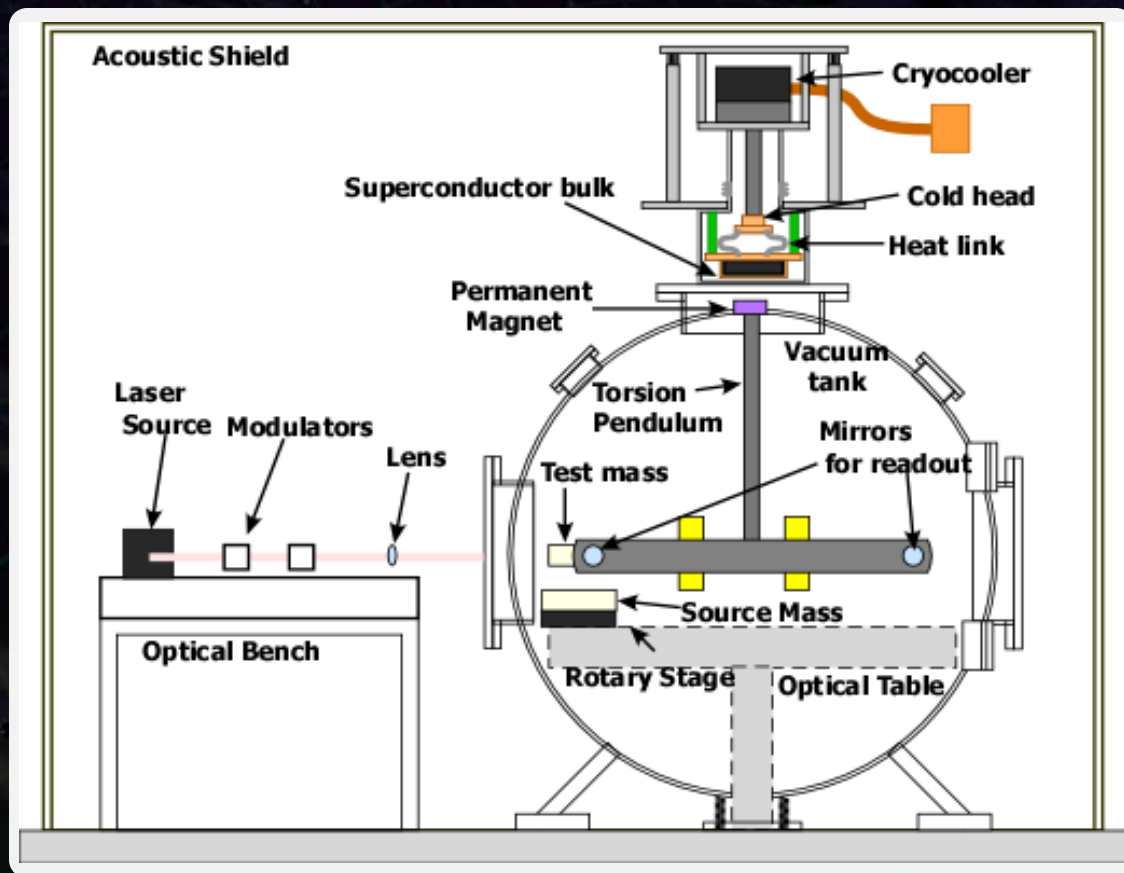
$\rightarrow$  Null測定を行う

## 真空槽

直径600mm円筒形

真空度  $10^{-5}$  Pa (ターボポンプ)

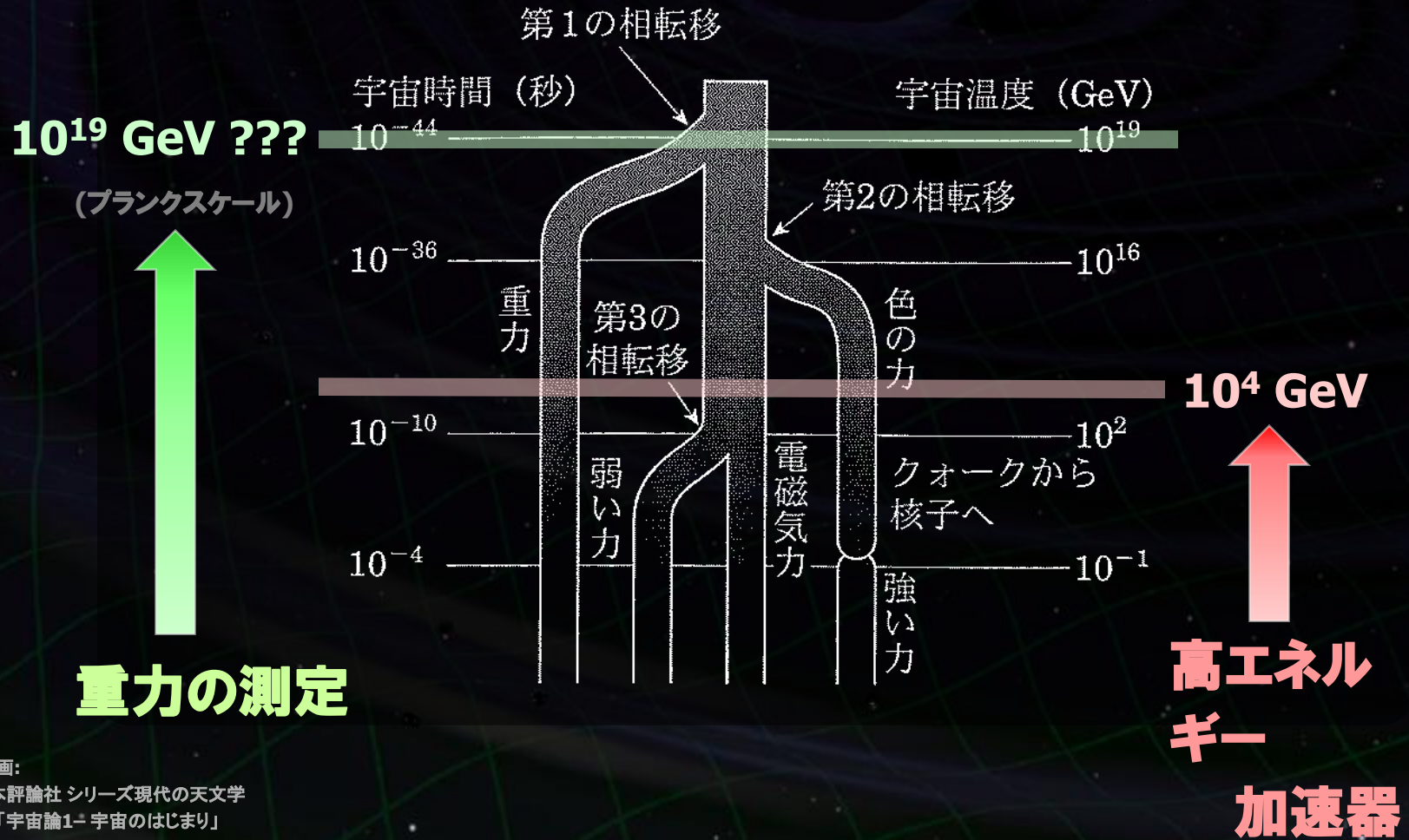
防音・断熱シールド内に設置





# 力の分岐と実験的検証

## 力の分岐



背景画:  
日本評論社 シリーズ現代の天文学  
「宇宙論1- 宇宙のはじまり」

# 重力の逆二乗則の検証

- 物理学の基本法則  
→ 可能な最高精度で検証されるべき。

- 物理学の根本に関わる問題...

## 階層性問題

(Hierarchy Problem)

重力だけが極端に弱い

## 宇宙項問題

(Cosmological Constant Problem)

ダークエネルギーの大きさが、

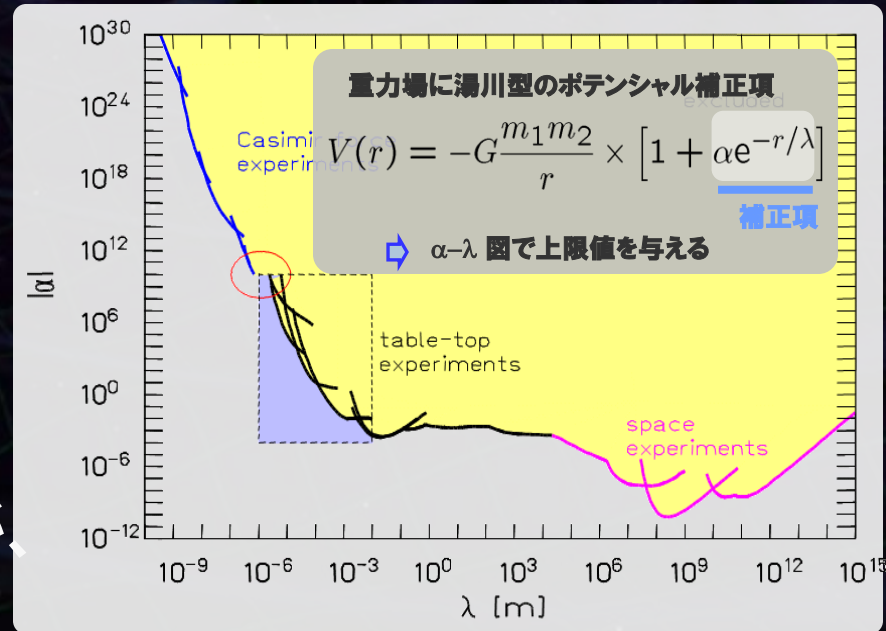
## 真空場

揺らぎの存在で説明の極端可能性

小さい

→ 微小距離 (0.1mm以下) での  
重力の逆二乗則の破れとして現れる

## 重力補正項に対する上限値





# 近年の検証実験

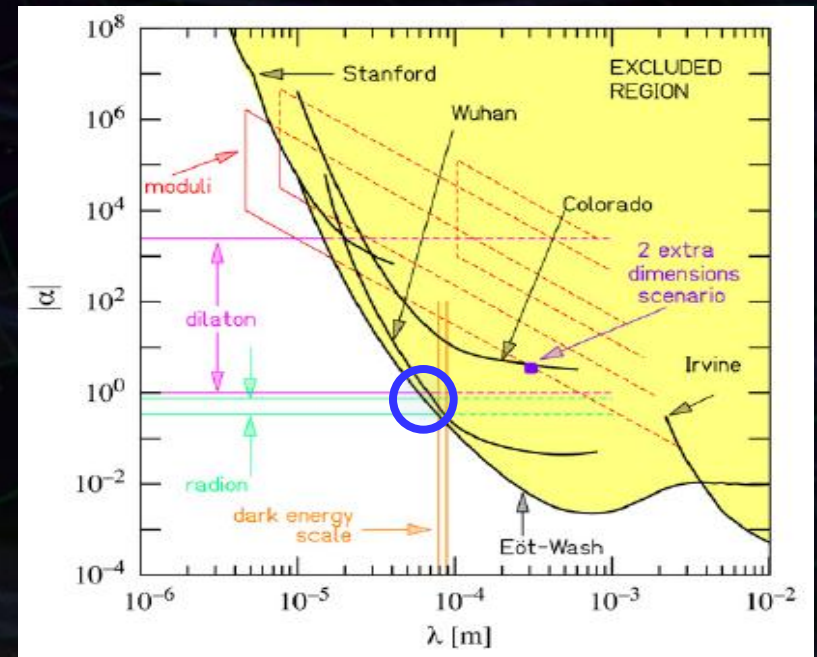
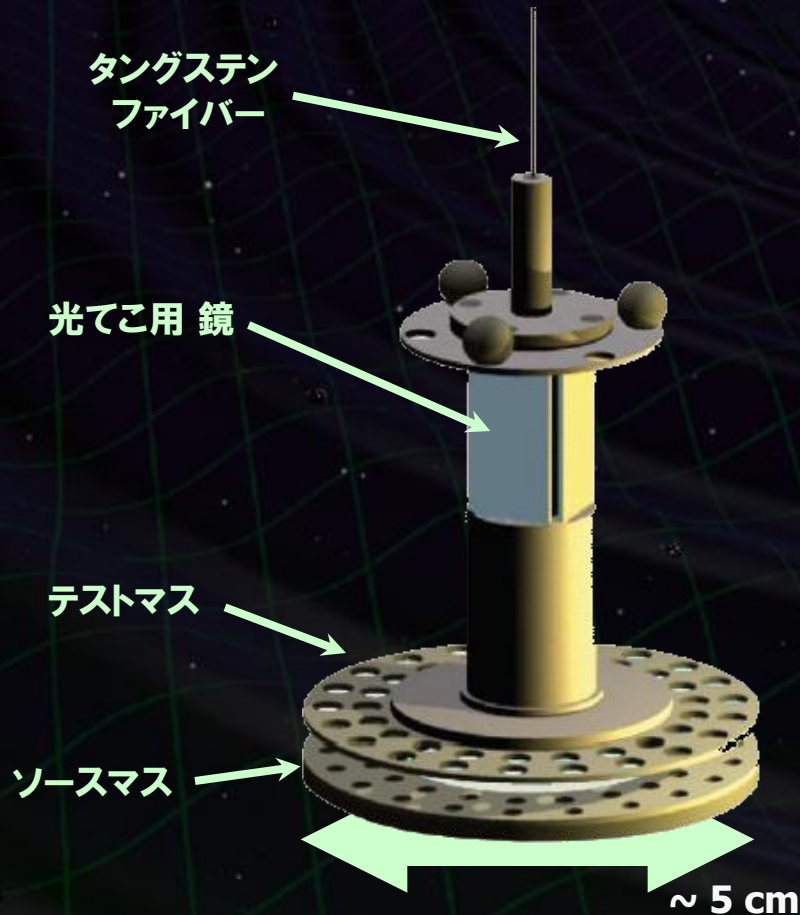
ワシントン大 グループ (Eot-Wash group)

0.1mm以下のスケール

→ 最も良い上限値

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \times [1 + \alpha e^{-r/\lambda}]$$

⇒  $|\alpha| < 1, \lambda = 56\mu\text{m}$



D. J. Kapner et al., PRL 98 (2007) 021101

# 結果の解釈

## 大きな余剰次元 (Large extra dimensions)

最も大きな余剰次元のスケール

$$R \leq 44 \mu\text{m} \quad (\text{C.L. } 95\%)$$

n=2のときのエネルギースケール

$$M^* \geq 3.2 \text{ TeV}/c^2 \quad (\text{C.L. } 95\%)$$

(参考)  $M^*$ についての他の制限 (TeV)

		n=2	n=4	n=6
加速器実験	LEP	1.2	0.73	0.53
	Tevatron	1.14	0.86	0.78
超新星爆発	SN1987A	5	1	0.1

川崎雅裕  
「TeV重力理論」  
別冊・数理科学(2009)



# 研究の目標

実験の目標:

補正項に対する上限値の更新  
逆二乗則の破れの探査

初期目標:

1mm程度のスケールでの測定

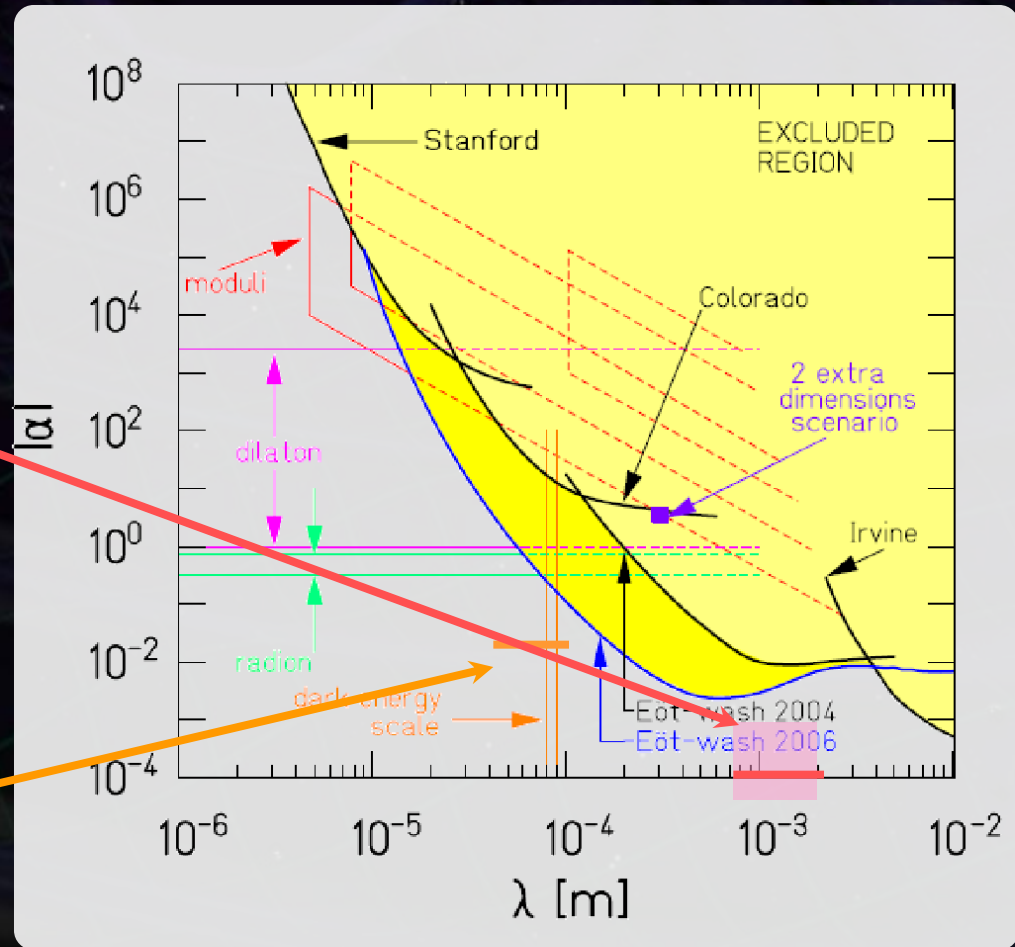
$$|\alpha| < 10^{-4}, \quad \lambda = 1-3 \text{ mm}$$

(従来の上限値を2桁更新)

次の段階:

0.1mm程度のスケールでの測定

$$|\alpha| < 10^{-2}, \quad \lambda = 0.1 \text{ mm}$$



# 測定と信号処理

## 測定の流れ

### ・ソースマス駆動

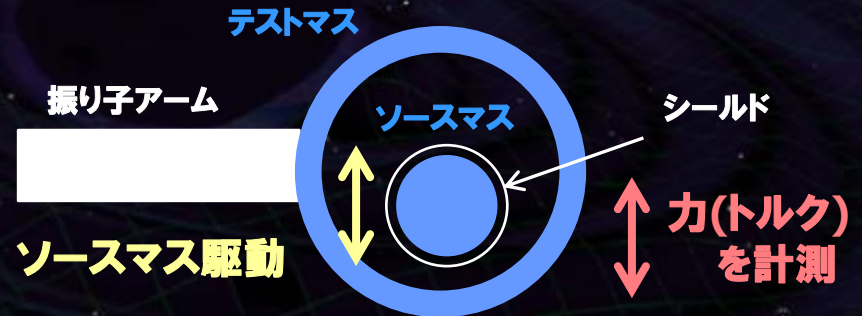
周波数 0.07Hzの正弦波  
振幅  $\pm 150\mu\text{m}$

⇒ 変調により、  
力の微分を測定

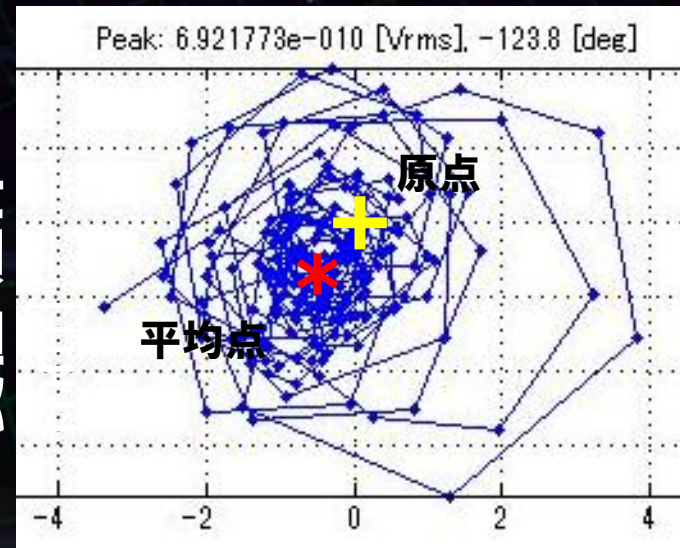
### ・長時間測定とデータ処理

積分時間 10hour  
ソースマス駆動と同期した  
成分を取り出す。

$$\text{SNR} \propto 1/\sqrt{T_{\text{meas}}}$$



変位 虚部



変位 実部

[nm]



# 測定結果と解釈

## 測定結果の例

### ・ソースマス駆動

- 周波数 0.07Hzの正弦波
- 振幅  $\pm 150\mu\text{m}$
- セッティングの簡便化  
→テストマス側面に配置.
- 積分時間 10hour

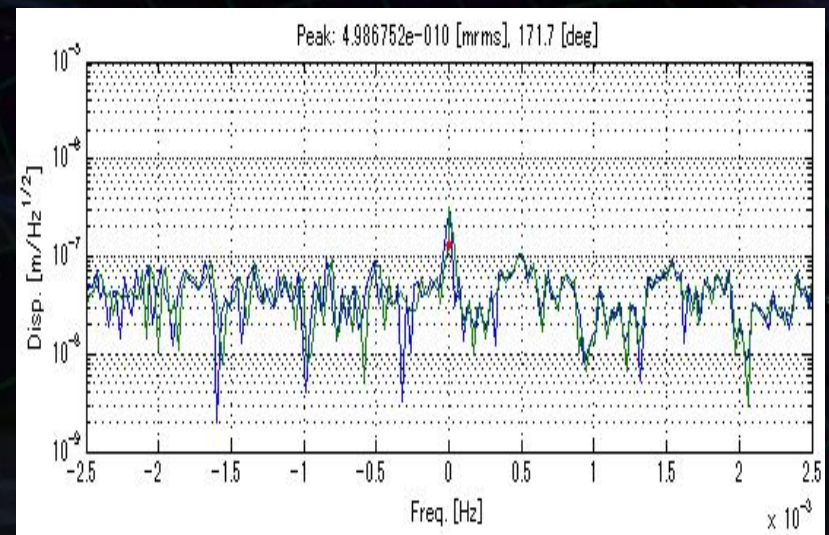
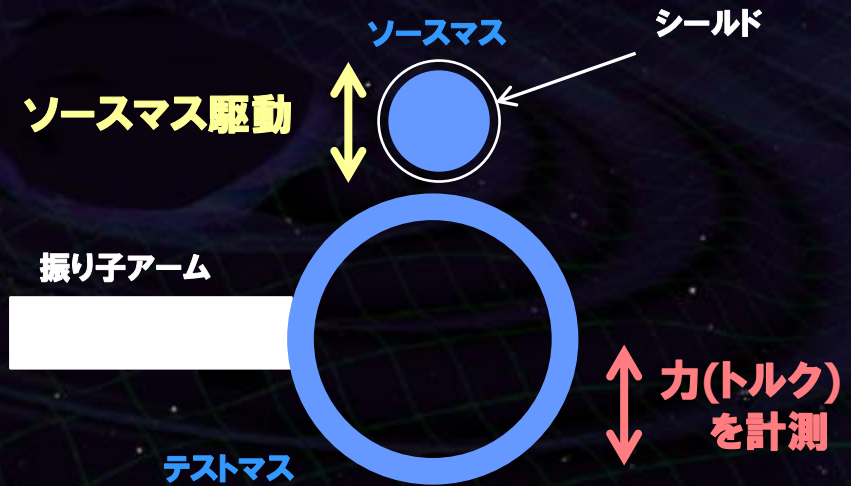
### ・計算値

ニュートン重力  $2 \times 10^{-12} \text{ N/mm}$

湯川項  $1 \times 10^{-11} \text{ N/mm}$

・測定結果  $8 \times 10^{-11} \text{ N/mm}$

⇒  $|\alpha| < 8 \quad (\lambda = 1\text{mm})$



# 分子スケールでの重力法則検証

Nesvizhevsky et. al,  
PRD 77 034020 (2008)

より短距離 ( $< 10^{-8}$  m)での  
重力法則の検証

先行研究: 中性子散乱実験の解釈  
 $\alpha < 10^{23}$  ( $\lambda \sim 1$  nm)

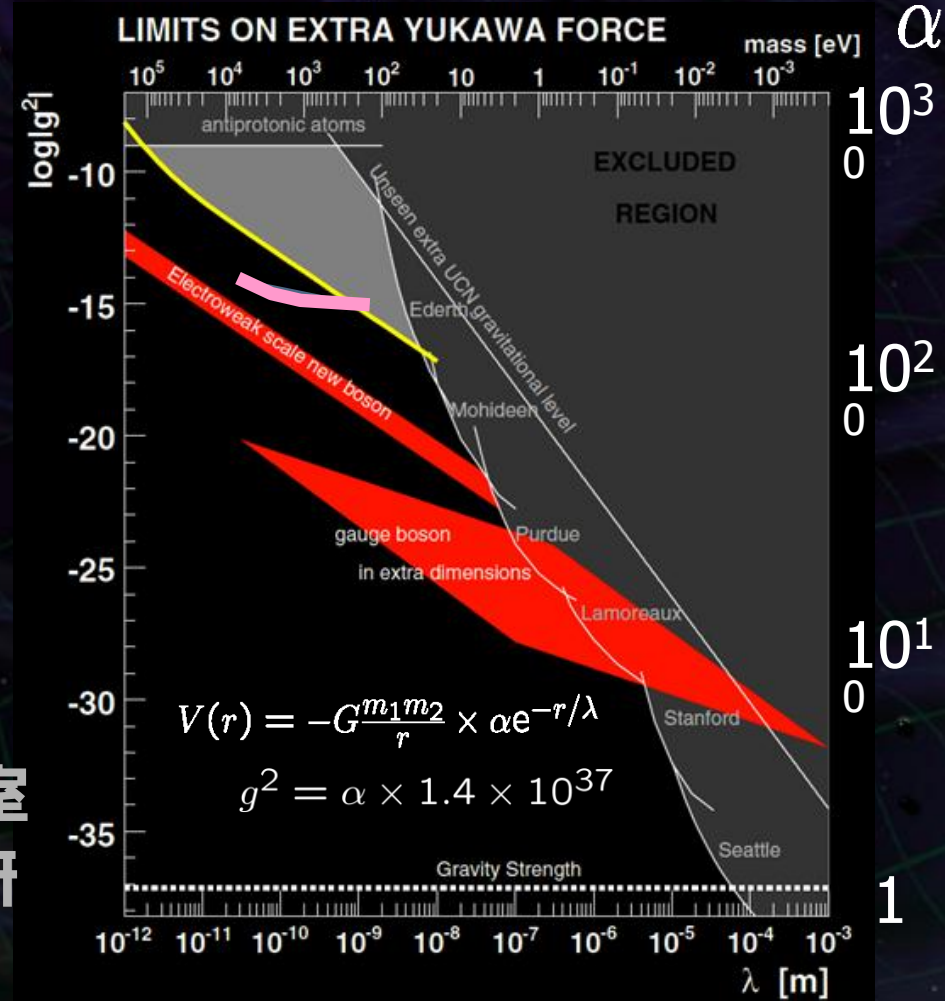


より良い制限を与える実験を実施中

光トラップされた  
中性原子・分子の精密レーザー分光

(京都大学・量子光学研究室  
との共同研

究)





# 2光子分子会合

光トラップされたYb原子

- 光会合により分子結合させる.
- さらに周波数シフトした光により電子基底状態へ遷移させる.

⇨ 2つの光の周波数差  
⇔ 分子の束縛エネルギー

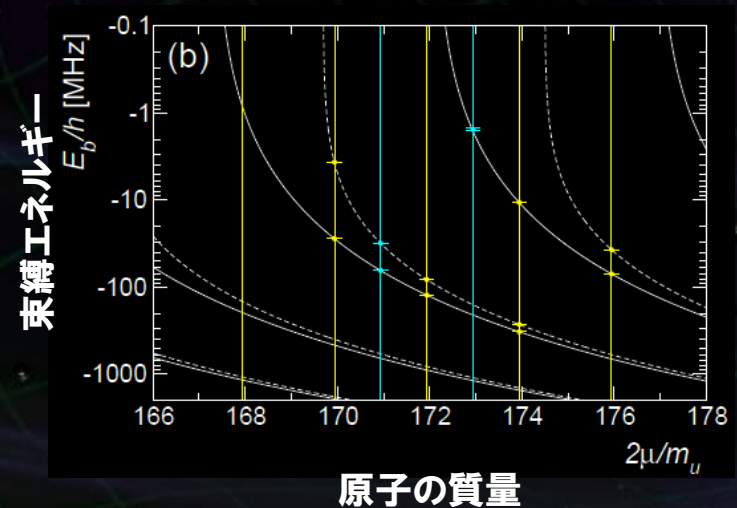
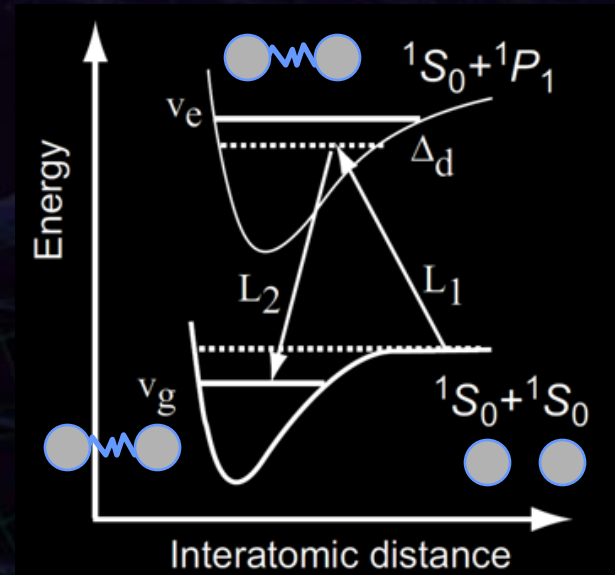
Born-Oppenheimerポテンシャルでモデル化

$$V(r) = -\frac{C_6}{r^6} - \frac{C_8}{r^8} + \frac{C_{12}}{r^{12}}$$

⇨ 100kHz以下の精度で一致

Kitagawa, et al., PRA 77, 012719 (2008)

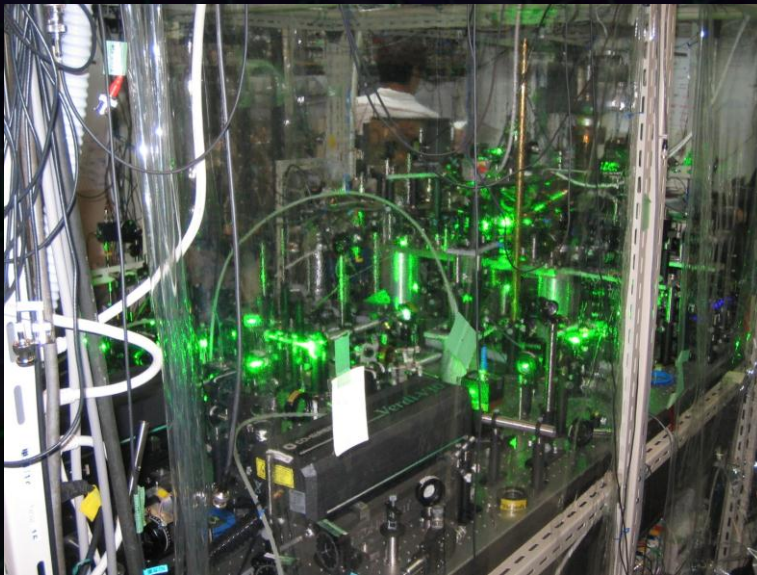
重力補正項に対する  
上限値を与えることが可能.



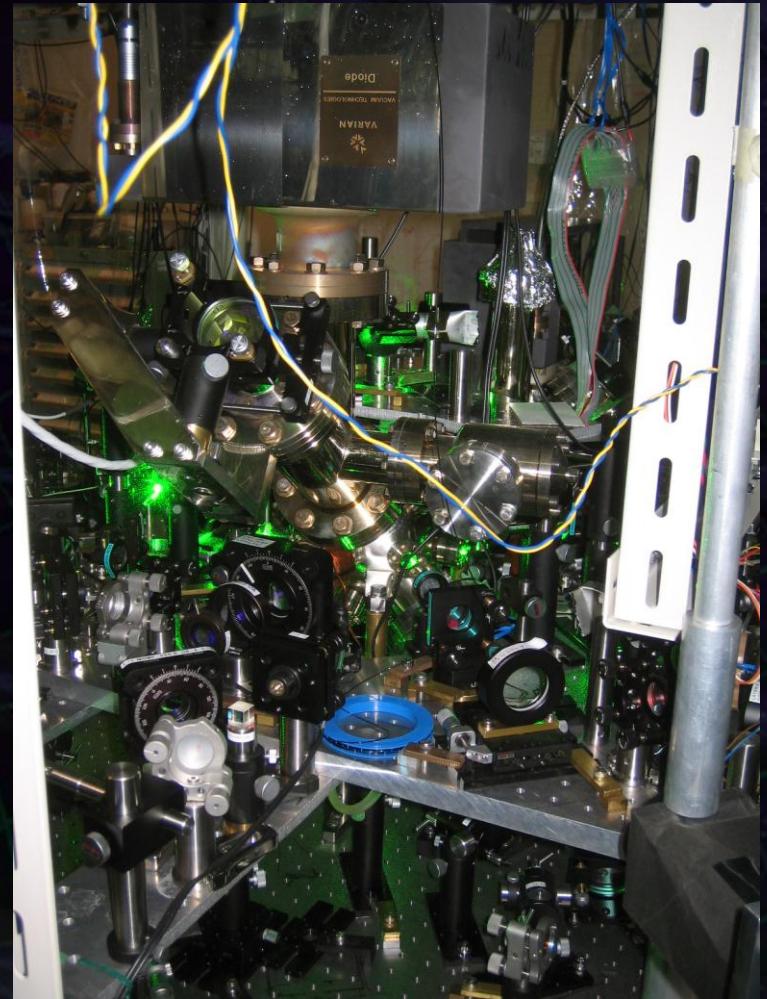
# 実験の現状

より精度の高い測定を目指し  
光格子での分光測定が進行中  
学生2名が実験を進めている。  
(京都大 + 東京大)

⇒ 今年度中に結果を得る予定



光トラップおよび  
2光子光会合測定装置





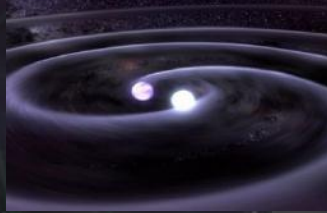
# 宇宙重力波望遠鏡のターゲット

宇宙重力波望遠鏡 -- 0.1mHz – 1 Hz の観測周波数帯

⇒ 中間/巨大ブラックホール, 初期宇宙

中性子星・白色矮星

連星



パルサー



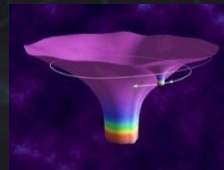
定常的・準静的な自転・公転運動

ブラックホール



巨大ブラックホールの合体

EMRI



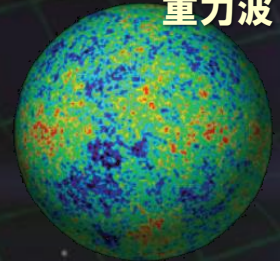
準固有振動

初期宇宙

多数天体の重ね合わせ

背景重力波

原始背景重力波



電磁波  
ニュートリノ

同時観測  
数値相対論

重力理論の検証

超巨大BHの形成過程  
銀河形成史

宇宙論, 宇宙の誕生と発展  
ダークエネルギー・ダークマター

# DECIGOの概要

互いに1000km離れた3機のS/C

非接触保持された鏡間距離

太陽公転軌道

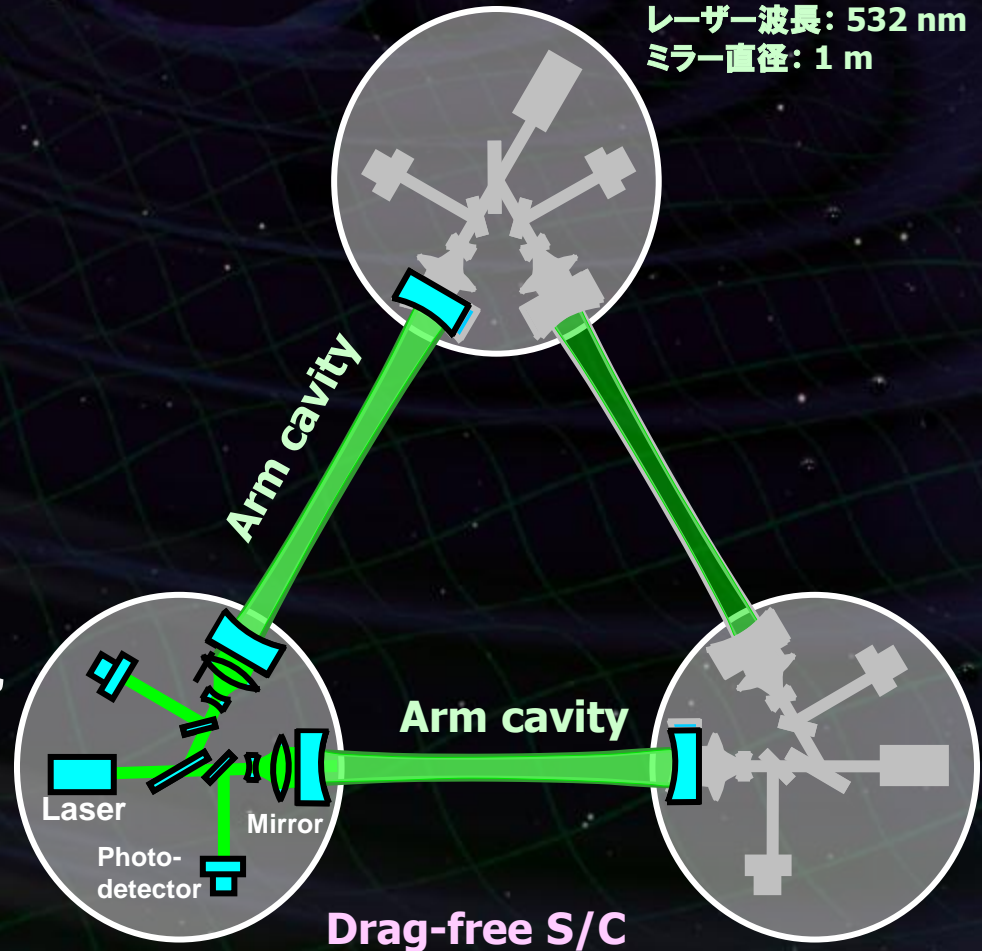
最大4ユニットで相関をとる

精密測距

初期宇宙からの重力波,  
連星からの重力波の観測

→宇宙の成り立ちに関する知見

光共振型マイケルソン干渉計  
アーム長: 1000 km  
レーザーパワー: 10 W,  
レーザー波長: 532 nm  
ミラー直径: 1 m



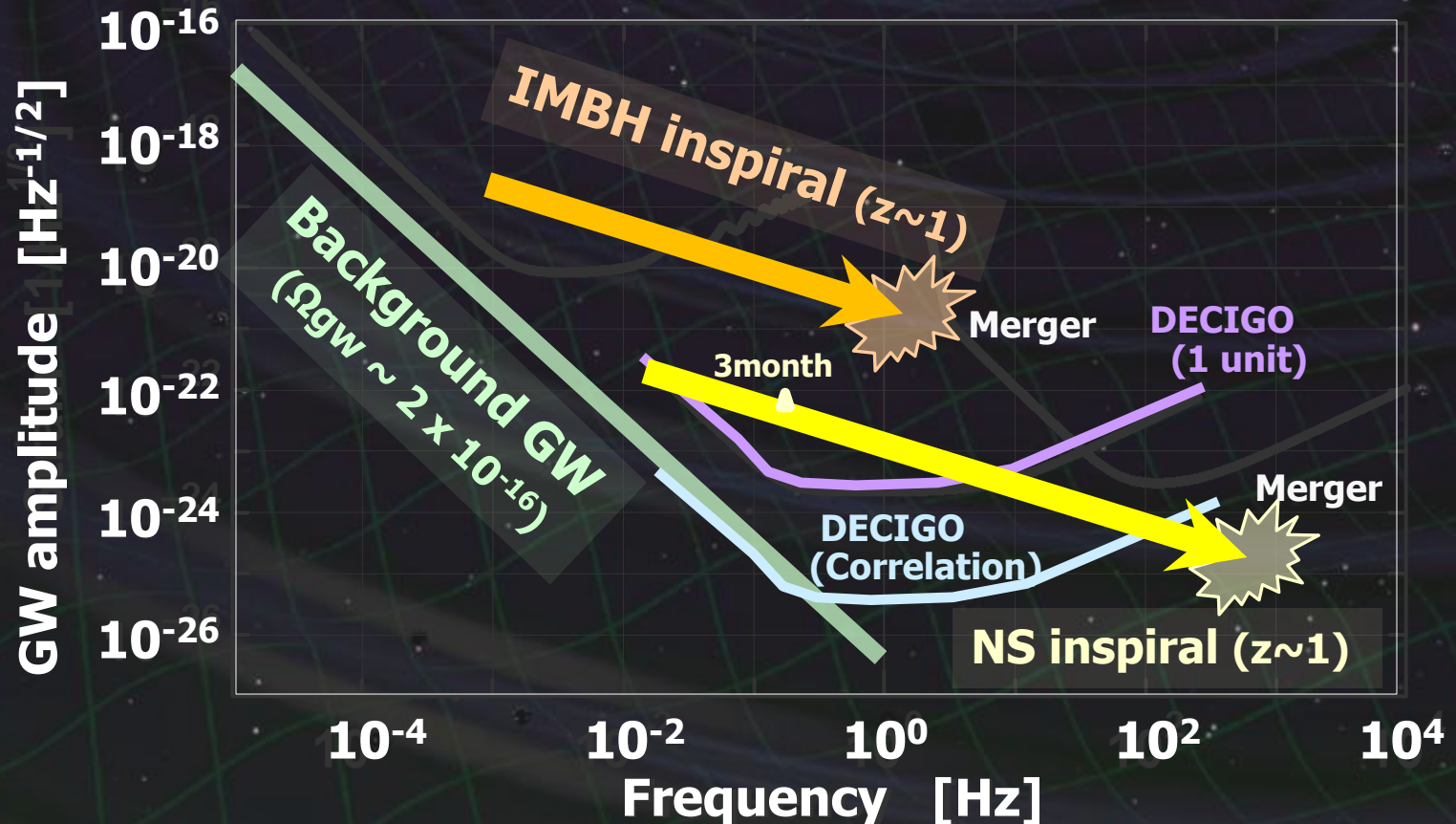


# DECIGOの観測対象

**IMBH binary inspiral**  
**NS binary inspiral**  
**Stochastic background**



**Galaxy formation (Massive BH)**  
**Cosmology**  
(Inflation, Dark energy)



# 宇宙ミッションの位置づけ

## • DECIGO計画の大きなサイエンス

- LCGT(KAGRA)やLISAの更に先の計画.
- 重力波を用いた初期宇宙観測・宇宙論的知見など.  
→ いつかは必ず実現されるはず.

## • 重力波分野内外への責任

- JAXA・小型科学衛星 戦略的開発経費のサポート  
→ DPFの3号機ミッション提案 (2012年後半予定) を前提.
- 宇宙分野を期待して重力波分野へ進んだ学生たち.
- LCGT以外・海外からの参加・協力 (DECIGO-WG実験家の7割以上)

## • 宇宙分野の研究開発も継続するべき

- DPFの3号機ミッション提案：主にミッション検討.
- 時間を要する活動：人材の継続的な育成, 分野外への普及.
- 重力波分野の研究領域の拡大.

⇒ リソース配分については、現状を正しく説明。  
研究活動の規模は、状況に応じて対応。



# DECIGOパスファインダー

DECIGOパスファインダー (DPF)

代表: 安東

将来の宇宙重力波望遠鏡のための前哨衛星

小型衛星 1 機 (重量 350kg)

地球周回軌道 (高度 500km)

非接触保持された試験マスの変動を  
レーザー干渉計を用いて精密計測



宇宙・地球の観測

→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

先端科学技術の確立

→ 宇宙・無重力環境利用の新しい可能性

小型科学衛星3号機 (~2015年) を目指す

Earth Image: ESA



# DPFシステム概要

## DPF Payload

Size : 950mm cube  
Weight : 150kg  
Power : 130W  
Data Rate: 800kbps  
Mission thruster x12

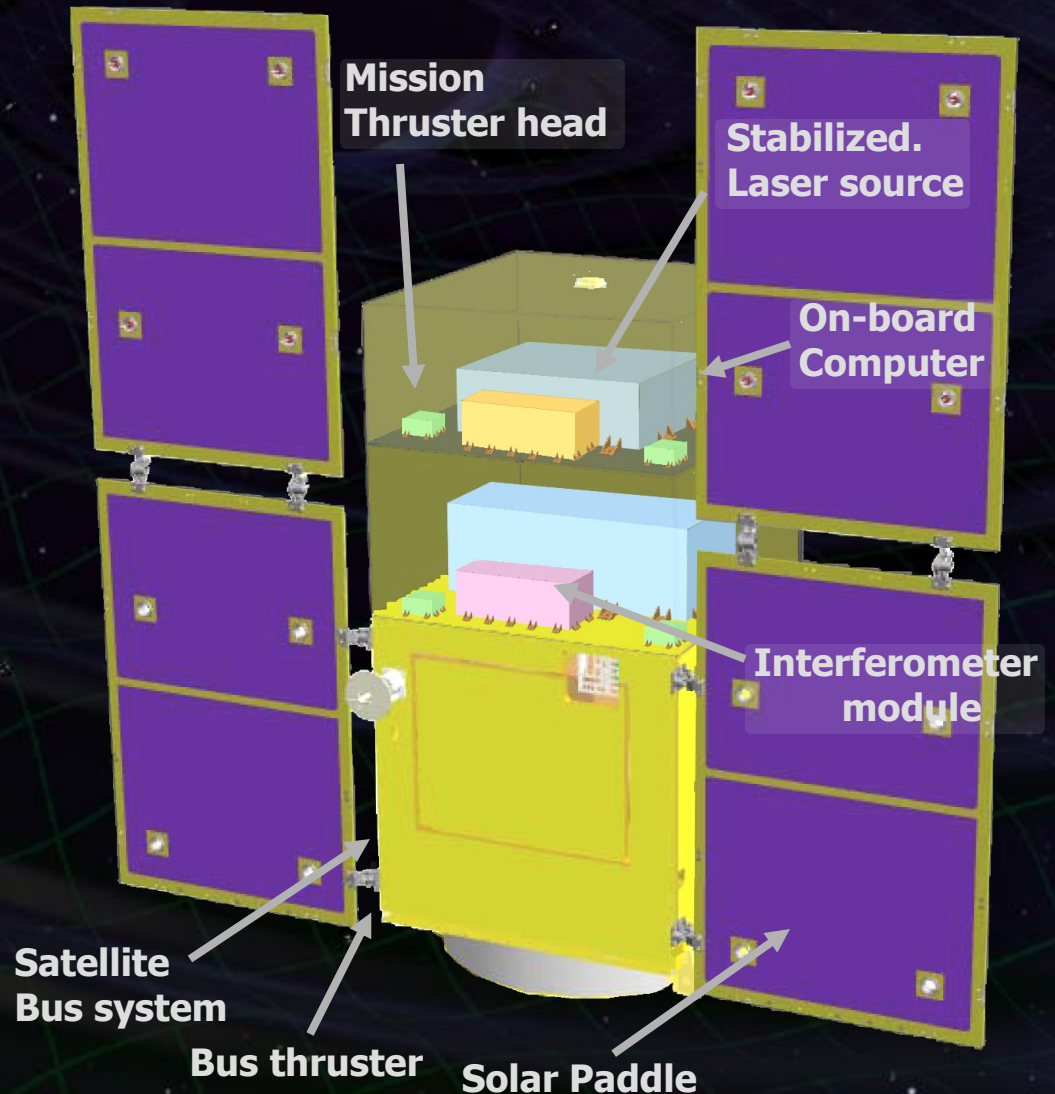
Power Supply  
SpW Comm.



## Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

Size :  
950x950x1100mm  
Weight : 200kg  
SAP : 960W  
Battery: 50AH  
Downlink : 2Mbps  
DR: 1GByte  
3N Thrusters x 4



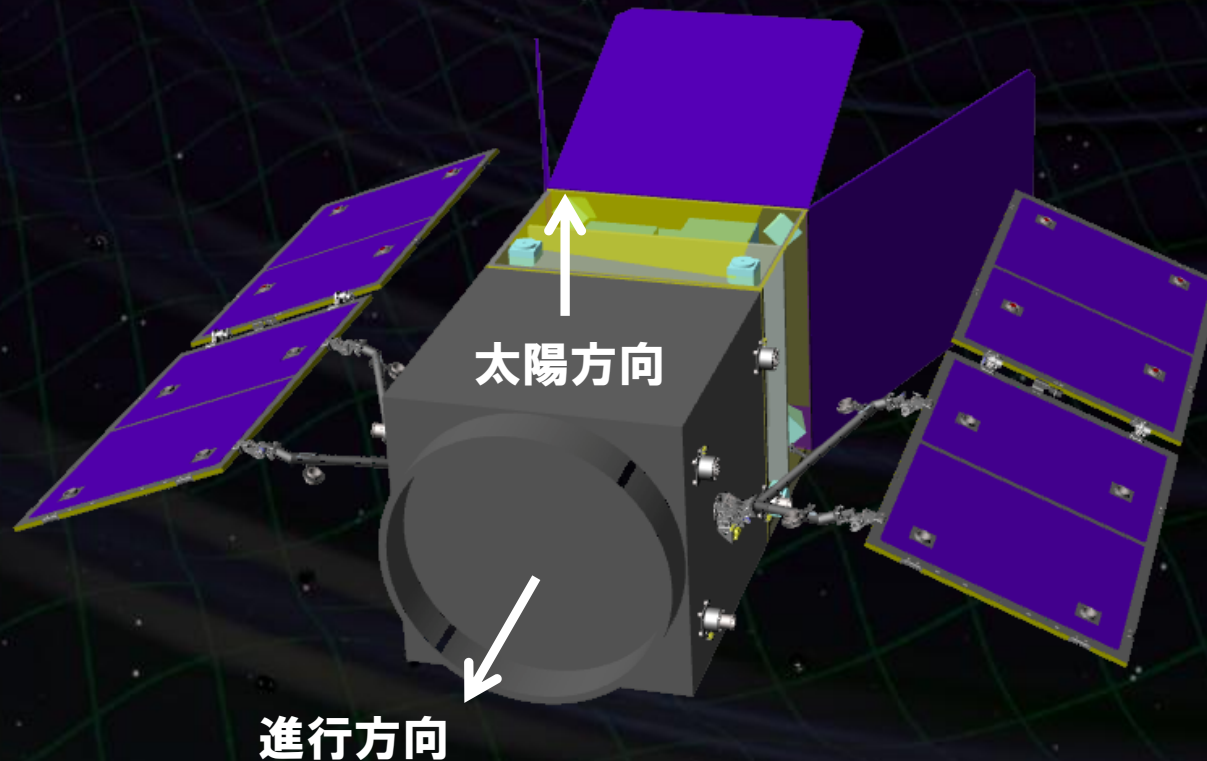


# 受動姿勢安定の検討

## DPF衛星形状の設計

衛星振動の影響を避けるため、RWは搭載しない → 姿勢安定が重要.

- 地球大気・太陽輻射圧に対する受動姿勢安定形状の検討.
- 初期姿勢捕捉シーケンスの検討.



# DPFの観測目標

重力波により宇宙を見る

銀河系内のBH連星合体

→ 巨大BH形成への知見.

DPFの感度では

~30個の球状星団を観測可

能

重力で地球を見る

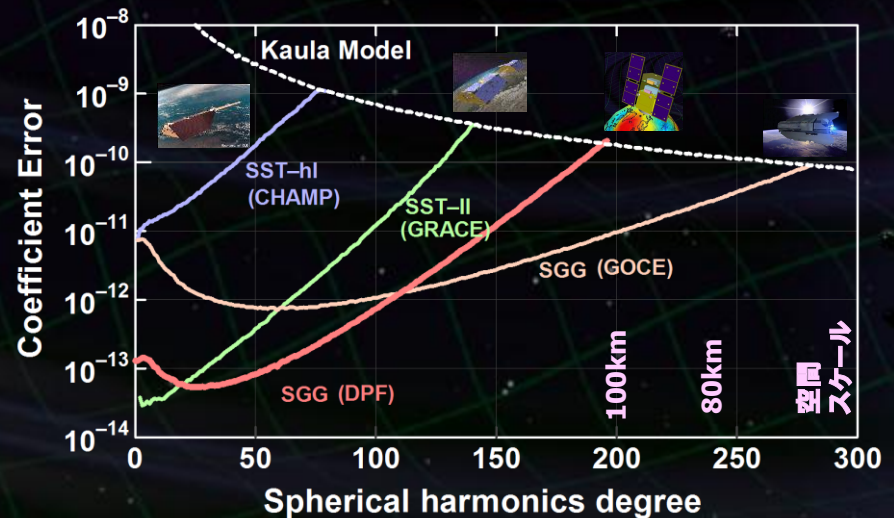
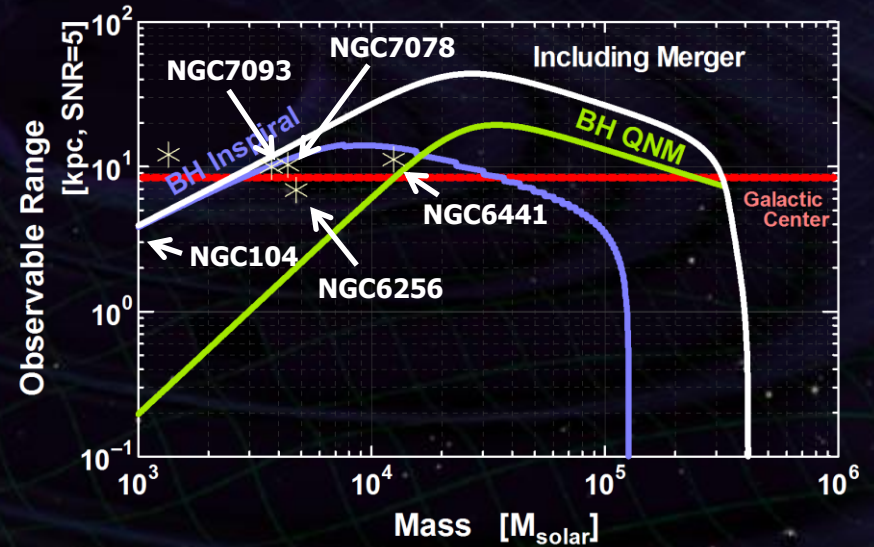
地球重力場の観測

地球形状の計測

地球環境モニタ

他の海外ミッションに匹敵する感度

国際観測網への貢献, 独自の観測





# メンバー構成

DECIGO-WG メンバー 145名

理論	57名
実験	80名
シニア	8名

実験 80名の内訳

KAGRAでも主要タスクを担うメンバー	17名
KAGRAでも一部のタスクを持つメンバー	3名
DECIGO/DPFのみに参加	57名
国外	4名

# MQM

