

# 平成24年度 留置き金配分のお願い

- 「KAGRA用超高性能光学素子の開発」  
(重力波プロジェクト推進室・上田)
- 「KAGRAの光学系開発のためのクリーン環境整備」  
(先端技術センター・阿久津)

**安東 正樹**

(国立天文台 重力波プロジェクト推進室)

# 内容

- **背景 (1) : KAGRA**
  - 概要, 現状
  - 組織, スケジュール, 予算
- **背景 (2) : KAGRAにおける国立天文台の役割.**
  - 重力波プロジェクト推進室
  - 先端技術センター
  - 長期的な見通し.
- **留め置き金申請について**
  - 超高性能光学素子の開発 (重力波プロジェクト推進室・上田)
  - 光学系開発のためのクリーン環境整備 (先端技術センター・阿久津)
- **まとめ**

# 背景(1) : KAGRA

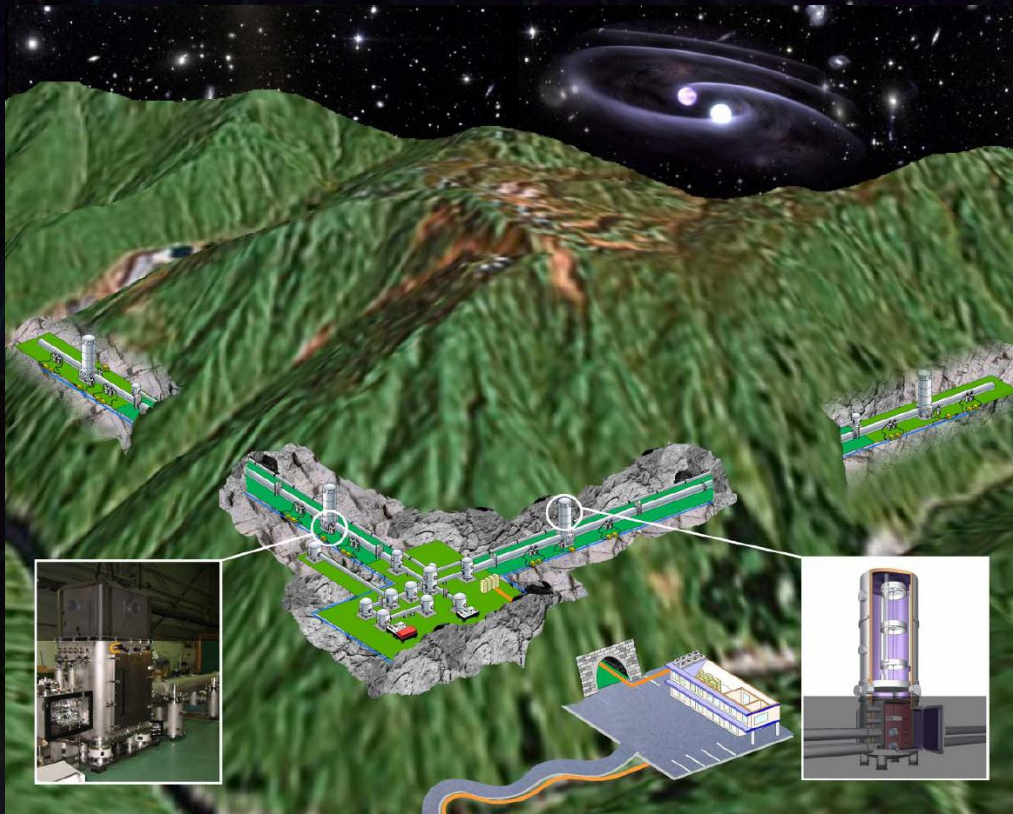
# 大型低温重力波望遠鏡

## かぐら (KAGRA)

(LCGT: Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

日本の次世代重力波検出器 (本格観測 2017年 - )

海外の望遠鏡 (Ad. LIGOなど) と同等の感度 → 国際観測網.



### 大規模な重力波天文台

- Baseline length: 3km
- High-power Interferometer

### 低温干渉計

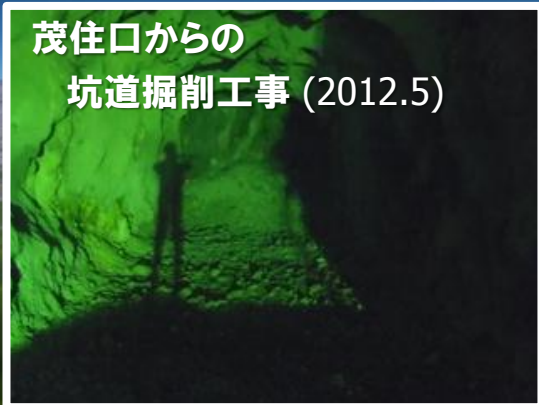
- Mirror temperature: 20K

### 地下の安定・静寂な環境

- Kamioka mine,  
1000m underground

# 神岡サイトでの建設工事

茂住口からの  
坑道掘削工事 (2012.5)



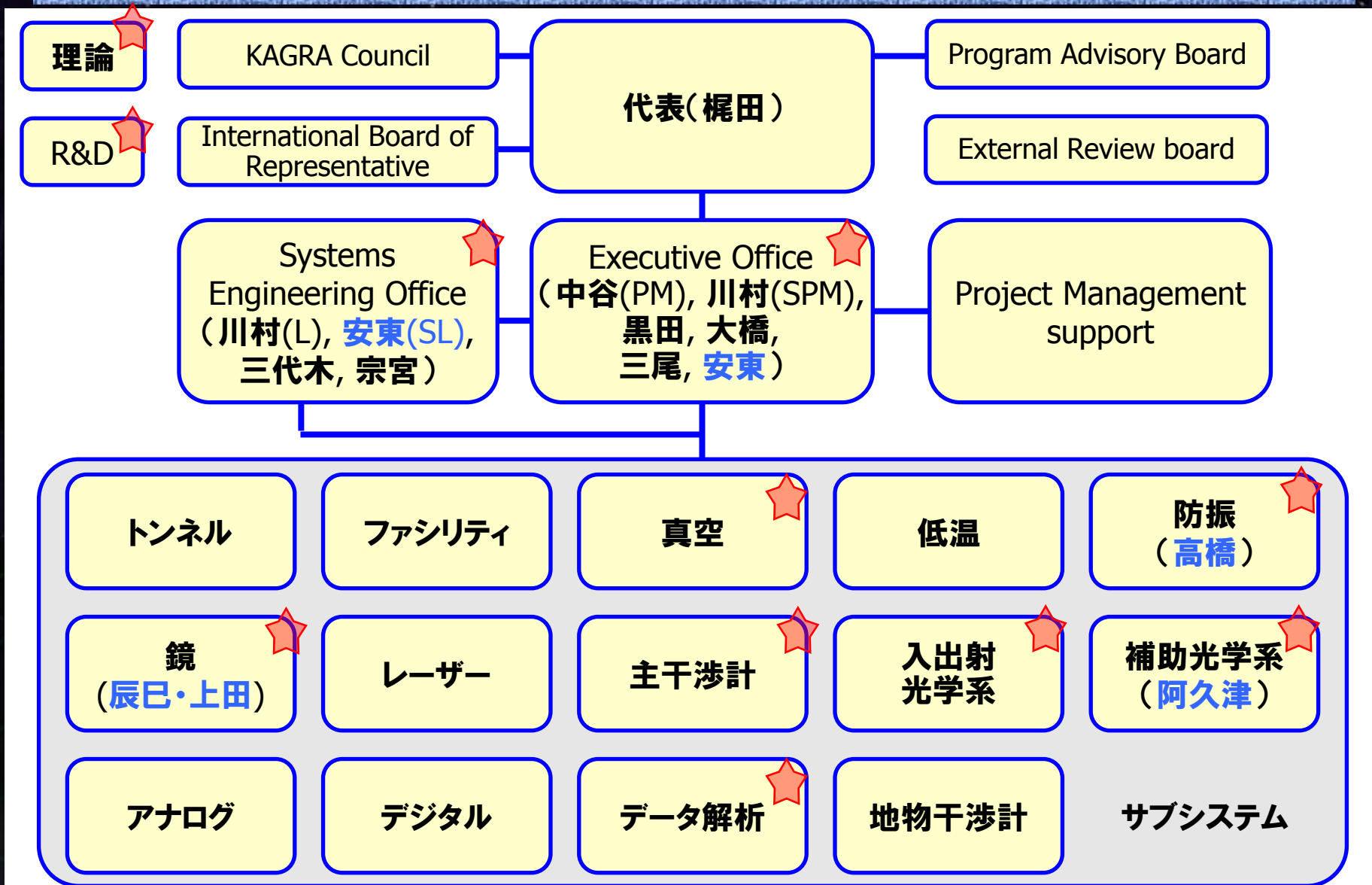
新跡津口の工事 (2012.4)



Gifu Pre.  
Hida-city  
Kamioka  
Ikenoyama mt.



# KAGRAの組織



# KAGRA全体スケジュール

## • iKAGRA (2010.10 – 2015.12)

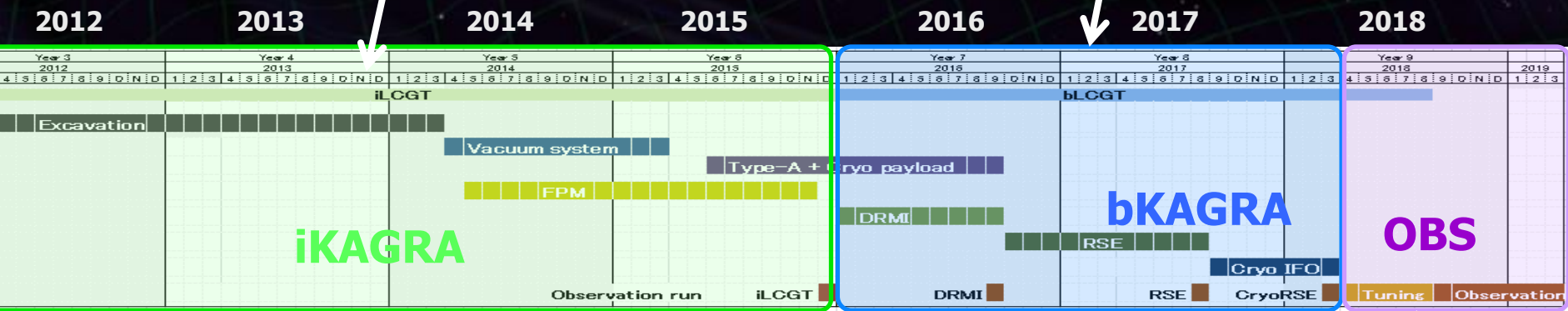
### 大型干渉計の安定動作を実現

- 基線長3kmの常温干渉計を動作.
- 比較的シンプルな光学系・防振系構成で総合システムとしての動作.

## • bKAGRA (2016.1 – 2018.3)

### 最終構成での動作

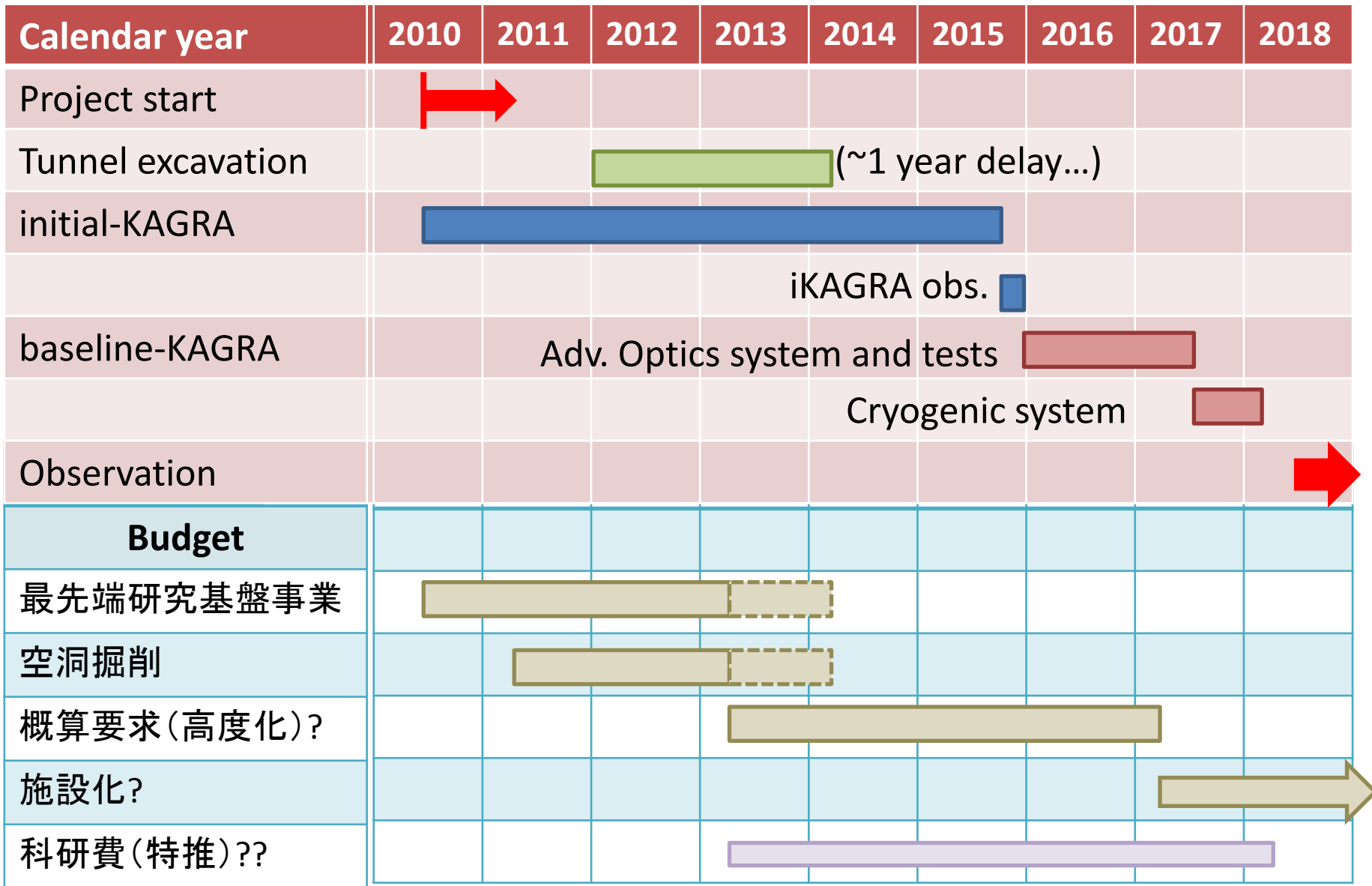
- 干渉計構成, 防振系最終形
- 低温干渉計としての動作.



## • OBS (2018.4 -)

長期間観測運転と干渉計チューニング.

# 建設スケジュール





## 背景(2) : KAGRAにおける天文台の役割

# 3機関覚書

## 大型重力波望遠鏡計画の推進についての覚書

東京大学宇宙線研究所、自然科学研究機構国立天文台および高エネルギー加速器研究機構は、大型重力波望遠鏡計画の実現が、物理学及び天文学の発展に重要な意義をもたらすことを認識し、宇宙線研究所の統括により、協力して計画を推進する。

この合意は、平成6年8月1日付け（平成8年8月1日付け更新、平成10年8月1日付け更新、平成12年11月20日付け更新、平成15年4月1日付け更新及び平成17年4月1日付け更新）の重力波の研究推進に関する三者合意を継承するもので、平成19年4月1日から2年間有効とし、3者間の協議により更新できるものとする。

平成19年2月28日

鈴木洋一郎

東京大学宇宙線研究所長  
鈴木洋一郎

観山正見

自然科学研究機構国立天文台長  
観山正見

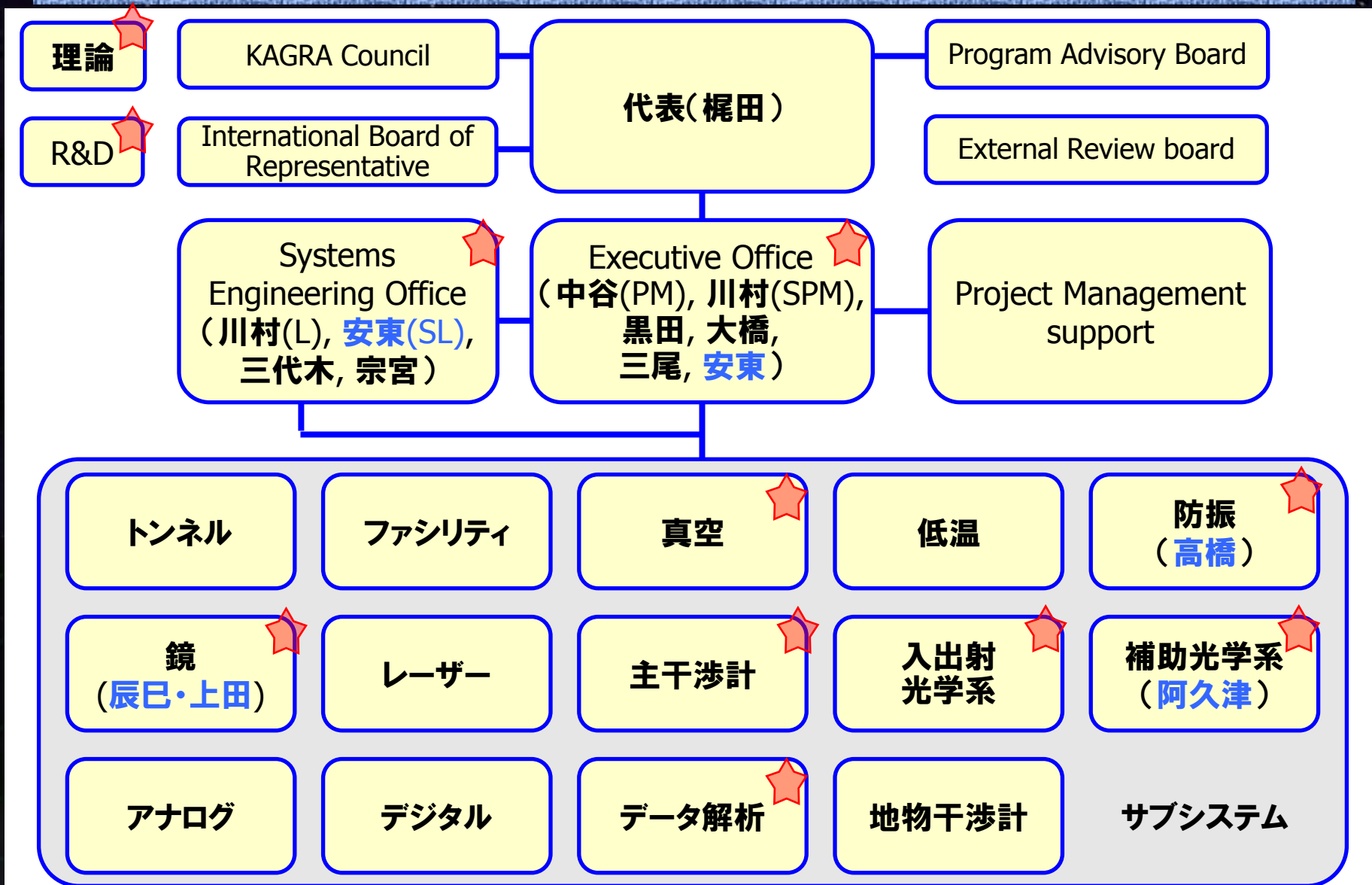
鈴木厚人

高エネルギー加速器研究機構長  
鈴木厚人

- ICRR-KEK-NAOJ間の  
KAGRA推進協力についての覚書。  
- 平成6年8月より  
- 平成8,10,12,15,17,19,21,23年  
にそれぞれ期間延長の合意。

- 平成24年6月19日  
KAGRA協議会で継続を確認。

# KAGRAの組織



# 重力波プロジェクト推進室

- **重力波検出器TAMA300の経験** → KAGRA内で主要な役割.
  - 執行部メンバー: 安東 (EO, SEO)
  - サブシステムチーフ: 高橋 (防振 VIS), 阿久津 (補助光学系 AOS)
  - サブシステムメンバー: 辰巳, 上田, 石崎, 端山, 我妻, 中村  
(鏡, 干渉計, 入出射光学系, データ解析, 理論研究).
- **TAMA施設の活用** → KAGRAの実現性向上, リスク低減.
  - TAMA300施設を利用した防振系、光学系の実機性能評価.
  - TAMA300設備(真空槽, 測定器, 光学部品等)のKAGRAへの利用.
- **重力波分野の先端研究** → 中心研究拠点 (成果の創出, 継続的發展).
  - データ解析体制や電磁波など他の観測手法との同時観測  
(いわゆる「マルチメッセンジャー観測」) 体制の構築.
  - 干渉計の高感度化技術, 次世代技術.

# 先端技術センター(ATC)

- 重力波プロジェクト推進室と協力しKAGRAを推進.
  - 重力波プロジェクト推進室から安東・阿久津がATC併任.
  - KAGRA側からの人的供給相談中.
- KAGRAを重点領域に位置付ける (ATC運営委員会).
  - 東大宇宙線研究所・梶田所長よりのサポートの依頼 (2012初頭).
  - 先端技術センター専門委員会報告書 (2012年5月).

「先端技術センターは、東京大学宇宙線研究所および国立天文台重力波プロジェクト推進室と協力し、KAGRA建設に必要な光学・機械系開発において中心的な役割を果たすべきである。」

## → 具体的な議論を開始

- 4/24 先端技術センター - かぐら 協力キックオフ会議
- 6/5 補助光学系(AOS) 具体的・技術的な検討会.
- 6/21 AOS具体スケジュール, 人員配置などの相談.
- 鏡(MIR)等のサブシステムについても議論を継続.

# ATCへの協力依頼

国立天文台 台長 観山正見 先生

## 国立天文台先端技術センターのKAGRAへの支援について（要望）

日頃より宇宙線研究所、及び重力波 KAGRA（旧名 LCGT）プロジェクトのことについていろいろお世話になっており、感謝しております。

KAGRA プロジェクトは予算要求時より、国立天文台および高エネルギー加速器研究機構と宇宙線研究所が、3機関覚書を取り交わして開発研究を推進してきました。建設が認められた後は、国立天文台から複数名が宇宙線研究所に出向してきており、また国立天文台においても重力波プロジェクト推進室を中心として様々な協力をお願いしてきました。特に、阿久津智助教には KAGRA 周辺光学系（メインミラーおよび入射光学系を除くすべての光学系）のチーフとして、高橋竜太郎助教には宇宙線研に出向していただき防振装置のチーフとして活躍していただいているところです。

昨年末のトンネル掘削工事の入札で施工会社が鹿島建設に決まり、ついに着工することとなりました。既に真空系や低温系の設計・製作が並行して行われてきましたが、今後はレーザー干渉計の光学設計および光学部品の製作を最重要課題の一つとして進めていきます。この段階では国立天文台の誇る光学技術が KAGRA プロジェクトの成功のために必須であり、KAGRA 光学系の重要部分の設計・製作について、重力波プロジェクト推進室のみならず、開発実験環境が整備され優秀な人材を持つ先端技術センターからもご支援いただきたいと考えています。是非、今までにも増して国立天文台のお力をお借りしたいと考えています。

ご検討のほどよろしく申し上げます。

東京大学宇宙線研究所長  
KAGRA プロジェクト代表  
梶田 隆章

東大宇宙線研究所・  
梶田所長よりの  
サポートの依頼  
(2012初頭).

# 地上重力波望遠鏡のロードマップ



# 長期的な見通しと方針

- **現在-2018年頃** KAGRAの建設と最初の観測運転
  - 最初の重力波信号検出. 重力波天文学の幕開け.
  - KAGRAの建設, 観測運転が第1優先課題.
  - データ解析研究, 次世代重力波望遠鏡へ向けた基礎開発研究.  
→ プロジェクト推進と分野の継続的な発展のバランス.
- **2018-2023年頃** 本格的な観測運転とアップグレード
  - 多数の重力波信号観測, 干渉計先端技術の本格導入.
  - データ解析と本格的な天文学, 科学的成果の創出.
  - 宇宙重力波望遠鏡などへ向けた基礎開発研究.  
→ 研究分野の拡大, 研究拠点の形成.
- **2023-2028年頃** 第3世代重力波望遠鏡, 宇宙重力波望遠鏡.
  - 遠方の重力波源観測, 宇宙論的知見.
  - 世界的な協力関係の中で主導的な役割.



# 今回の申請について

# 留め置き金申請 (1)

・「KAGRA用超高性能光学素子の開発」 820万円

(申請者: 重力波プロジェクト推進室・上田)

- KAGRAミラーサブグループの重要タスクの1つ

\* 光学素子評価システムの開発 (<10ppm, 世界最高品質)

→ KAGRA鏡の開発・性能評価 (光学損失, 散乱).

\* 薄膜技術, 洗浄技術の開発 → 汎用光学技術としての展開.

- これまでの基礎研究で完成の見通しが立った. → 3年計画で提案

\* 今年度は立ち上げ経費として820万円程度.

\* 次年度以降は, 年間150万円程度を見込む ← 競争的資金等で措置.

\* 緊急性: 最終的なサファイヤ鏡だけでなく、入射系鏡の評価も必要.

\* 実績: TAMA鏡の開発において、当時の世界最小の

光損失(1.5ppm) を実現. [ Ueda+, OPTICAL REVIEW (1996) ]

\* 成果: KAGRAへの貢献 + 研究成果としてのアウトプットも期待.

# 本開発で期待できる研究成果と展開

## - 成膜技術の確立

- \* 従来の高性能鏡製作：経験や試行錯誤(成膜パラメータ調整)が必要.
- \* 本研究：成膜技術のデータベース化を行う。  
→ 異なる成膜装置を用いても同品質の鏡製作が可能に.

## - KAGRAなどの干渉計高感度化技術

- \* 光量子雑音低減のためのフィルター共振器技術.
- \* TAMA300の基線長を生かした独自の成果.

## - 光励起による真空分極の初観測

- \* 量子電磁気学の精密検証 (広島大との共同研究).
- \* キーワード:量子電磁気学、真空分極

## - ILC (国際リニアコライダー) のための新型偏極電子源

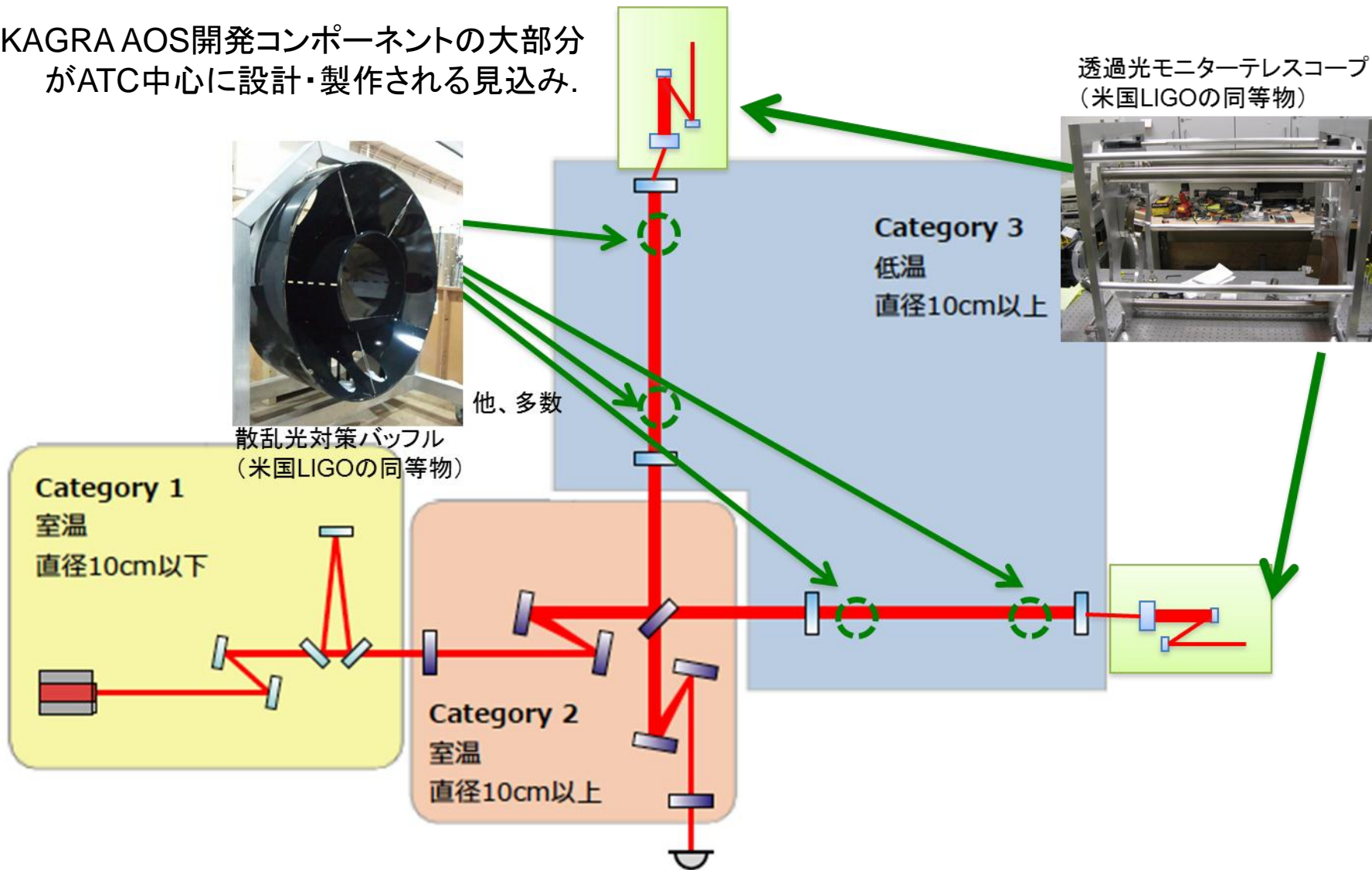
- \* 円偏光レーザービームと電子の相互作用(逆コンプトン散乱)による円偏極電子(陽電子)を生成 (KEK, 広島大).
- \* キーワード:パルスレーザー共振器、円偏光共振器

## 留め置き金申請 (2)

- 「KAGRAの光学系開発のためのクリーン環境整備」2,000万円  
(申請者: 先端技術センター・阿久津)
- KAGRA補助光学サブシステム(AOS)のメインファシリティー
  - \* 迷光・散乱光の処理, 光学素子のモニタ・制御  
→ KAGRAの観測性能を決める要因と成り得る.
  - \* 阿久津(AOSリーダー)が主導.  
→ ATCの施設・人員・経験を活用し開発拠点を形成.
  - \* 最先端技術プロジェクトへの参加 → ATC内での光学技術者の育成.
- KAGRAがATCで重点領域化されたことを受けた設備の整備.
  - \* KAGRAの高真空環境にインストールするコンポーネントの試験.  
(真空槽内バッフル, ビーム径縮小用望遠鏡, 光てこ装置など).
  - \* クリーンブース 1500万円, 周辺設備 500万円.
  - \* 製作されるコンポーネント自体はKAGRA経費でまかなう.
  - \* KAGRAへの貢献 + ATCリソースの有効活用, 技術力向上.

# KAGRA AOSコンポーネント

KAGRA AOS開発コンポーネントの大部分  
がATC中心に設計・製作される見込み.



# まとめ

# まとめ

- KAGRA : 重力波による新しい天文学を切り拓く最先端の観測装置.
- 国立天文台 : その主要な役割を担っている.  
TAMA300で世界最高感度を達成し、世界に先駆けて観測を開始した経験と実績.
- 今回の申請は、KAGRAの2つの主要サブシステムに対応.
  - 鏡サブシステム : 光学素子の最終評価システムの開発.
  - 補助光学サブシステム : 開発・評価のための主要設備の整備.
- 最先端の天文学を切り拓くKAGRAは、我が国の天文学の中心である国立天文台こそが貢献すべきプロジェクトである。是非、強力なサポートをお願いしたい。

終わり



# 前回説明資料など

# 説明事項

- KAGRA(大型低温重力波干渉計)用、超高品質光学素子の開発
  - > 3年の年次計画。
  - > この研究がKAGRAにとって、どの程度必要であるのか効果について説明。

# スケジュール

		2012				2013				2014			
		1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
洗浄技術	UV光源・その他方法の検討												
	環境整備												
	超純水												
	システム化												
光学素子評価技術	散乱計測												
	レーザー周波数安定化												
	システム構築												
	リジッド共振器作成												
	評価共振器作成												
薄膜物性評価	薄膜耐性評価光学系設計・構築												
	薄膜物性評価												
	コンタミ評価系構築												
	アニール及びアニール効果の評価												

# 鏡開発とKAGRA

- 干渉計を構成する最小限の要素は、鏡とレーザーである。
- 光のパワーは、TAMAの時の30倍！超低損失、高破壊耐力の薄膜が必要。
- KAGRAで鏡へ要求されている性能は、測る事さえ難しい値である。
- 測れていない物は、作れていないのと同じである。
- 鏡供給の失敗＝KAGRAの失敗

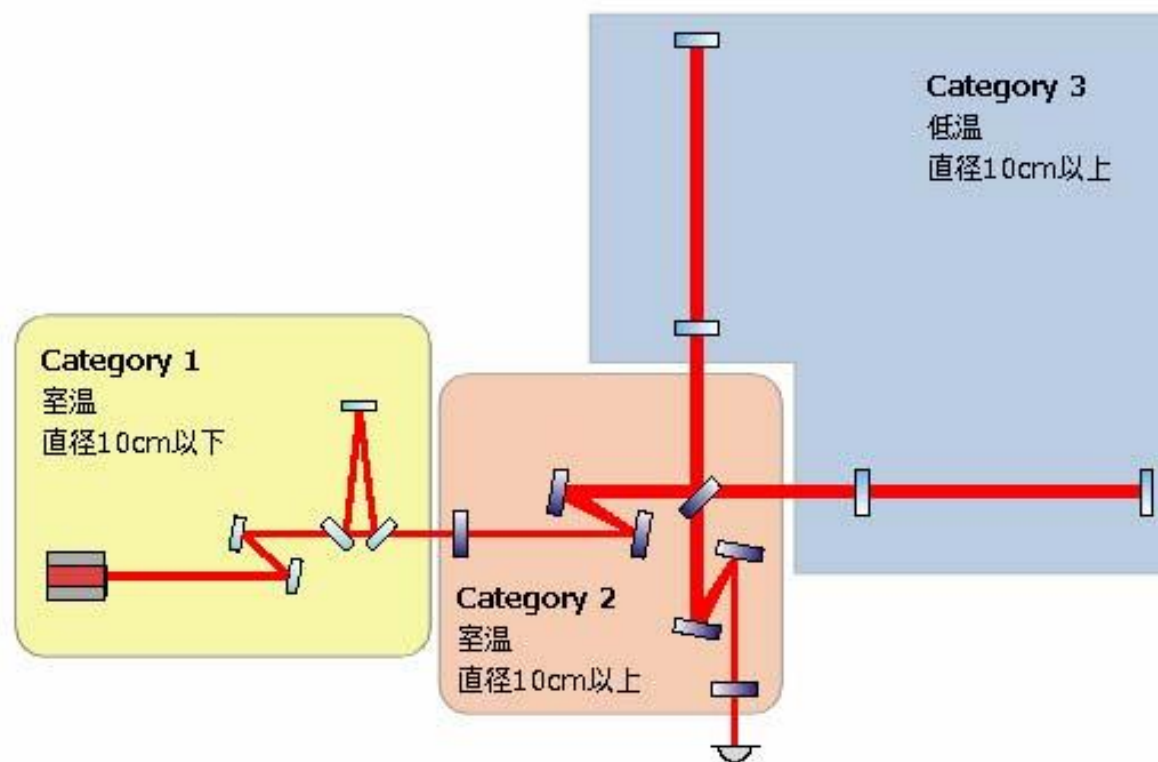
## 必要な性能

- 主干渉計の鏡口径：～250mm.
- トータル損失<100ppm(形状誤差による損失を含む、薄膜に許される損失は =<1ppm).
- 反射率: >99.99%.
- 曲率: <7,000 m. 重力変形込みで、モード分離無し.
- 吸収: <1ppm.
- 冷却に耐えること(20K).
- 高い光エネルギーにさらされつつ(400kW)、10年以上の耐久性を持つ事.
- ビーム径: <35mm.
- 設計曲率に対し、誤差0.5%. 局所的外れ<5nm. マイクロラフネス<1 Å 以下.
- サファイア基板.
- 干渉計外部光学系: 低散乱であること. 従来光学素子を使用した場合、ミラー一枚あたり小型レーザー並の散乱が生ずる.

# 他分野への貢献・波及効果

- 成膜技術のデータベース化。異なる成膜装置で同一の薄膜を作成する事を目指している。
- 超高品質光学素子の安定供給。
- 光学微少係数の精密計測。
- 洗浄技術の確立と定量的評価。
- 超平滑研磨・長曲率研磨技術の確立。
- 精密形状測定技術の確立。

## KAGRA に必要な3種類のミラー



# 国立天文台における KAGRA ミラー開発

2012      2013      2014      2015      2016      2017      2018      2019

## カテゴリー1：低損失ミラー

直径10cm以下  
室温  
大気中使用



3年 (開発期間)

製造  
1年

2016年4月  
までにデリバリー

## カテゴリー3：低温ミラー

直径22cm以上  
低温 (20K)  
真空



5年 (開発期間)

天文台ATCを  
はじめとして  
多くの機関の  
協力が不可欠

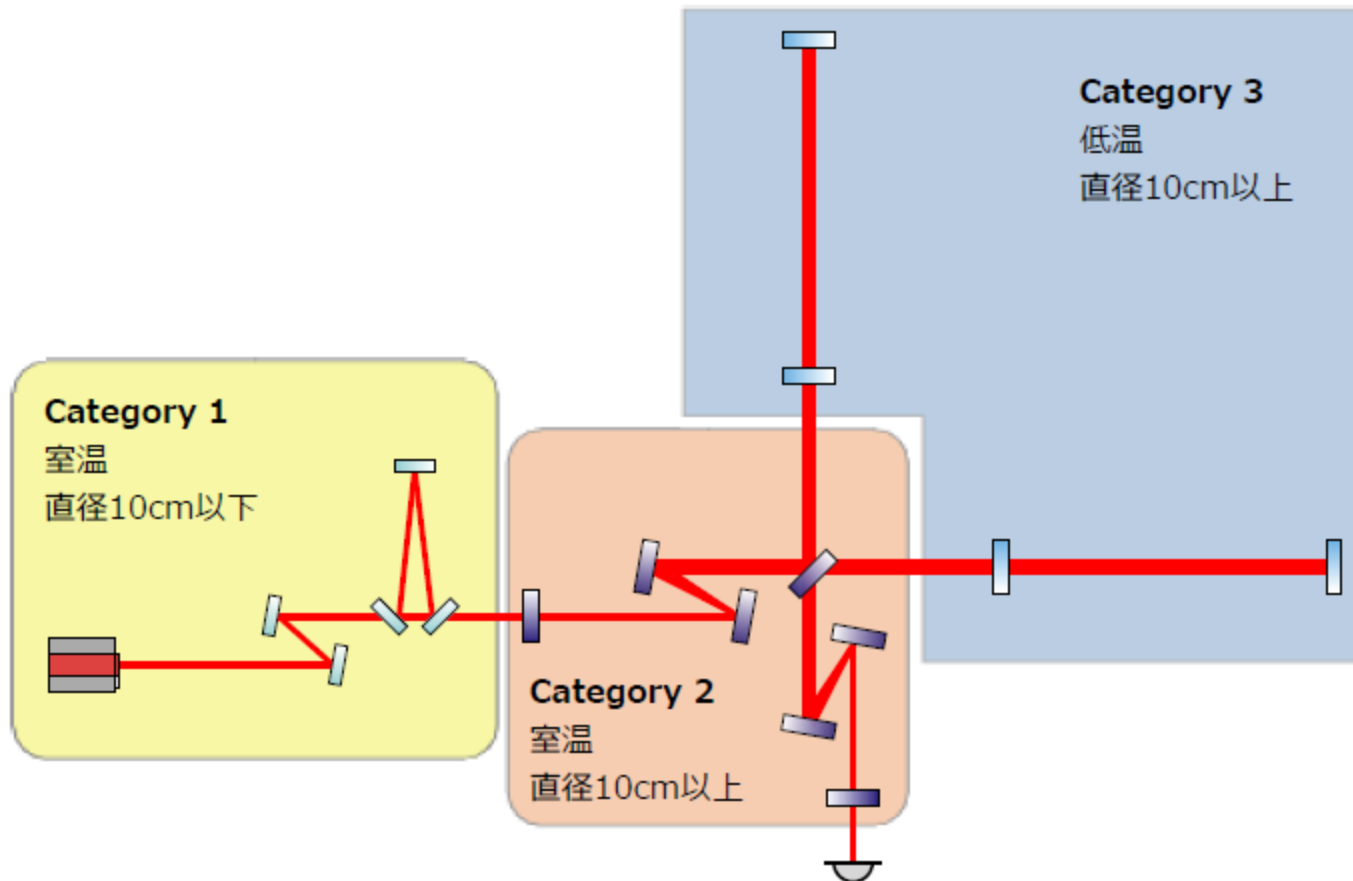
製造  
2年

2019年末の  
観測実験後  
ミラー交換





# KAGRA に必要な3種類のミラー



•財務・企画合同委員会 (June 29, 2012,  
NAOJ)

# 国立天文台における KAGRA ミラー開発

2012

2013

2014

2015

2016

2017

2018

2019

カテゴリー1：低損失ミラー  
直径10cm以下  
室温  
大気中使用

3年 (開発期間)

製造  
1年

2016年4月  
までにデリバリー

カテゴリー3：低温ミラー  
直径22cm以上  
低温 (20K)  
真空

5年 (開発期間)

天文台ATCを  
はじめとして  
多くの機関の  
協力が不可欠

製造  
2年

2019年末の  
観測実験後  
ミラー交換

•財務・企画合同委員会 (June 29, 2012,  
NAOJ)

# KAGRA（大型低温重力波干渉計）用 超高品質光学素子の開発

## ステップ1：

当面の目標は、**光学ロスが <10ppm** の超低損失ミラー  
このレベルが達成できれば、現在の**世界最高品質**

## ステップ2：

1996年に日本航空電子と国立天文台、電通大の共同研究で達成した  
**世界最高品質記録[1] 1.5ppm を自らの手で更新する。**

[1] Ueda, A., et al.: 1996, *OPTICAL REVIEW*, **3**, 369.

# 超高品質光学素子による 新たな領域開拓

## 第3世代重力波検出器技術：

KAGRA 検出器の更なる高感度化へ向けた**フィルター共振器の開発**

## 応用1：

### 光励起による真空分極の初観測（広島大との共同研究）

超高品質ミラーと重力波の超精密計測技術の融合により  
量子電磁気学の精密検証を可能にする。

キーワード：量子電磁気学、真空分極

## 応用2：

### ILC（国際リニアコライダー）のための新型偏極電子源（KEK, 広島大）

円偏光レーザービームと電子の相互作用（逆コンプトン散乱）により  
円偏極電子（陽電子）を生成する。

キーワード：パルスレーザー共振器、円偏光共振器



# KAGRA開発のビジョンについて。

## ICRR梶田所長から観山台長への要望書より

「国立天文台の誇る**光学技術**がKAGRAプロジェクトの成功のために必須」

「**先端技術センター**からもご支援いただきたい」

## ATCからの支援予定項目

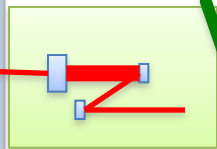
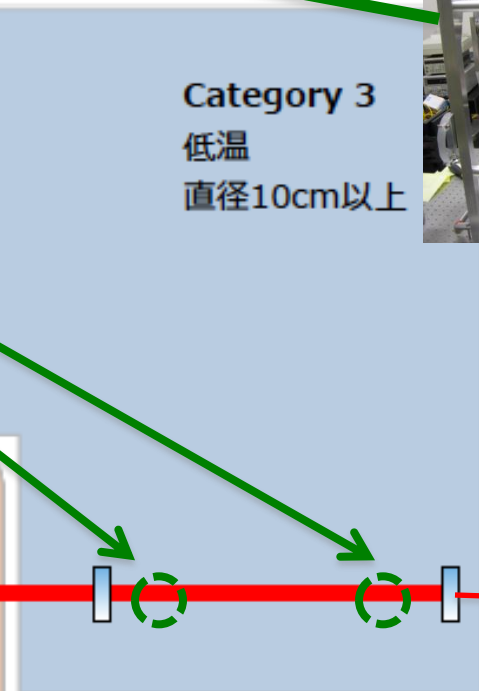
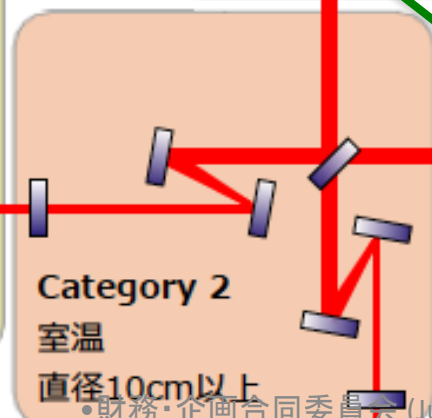
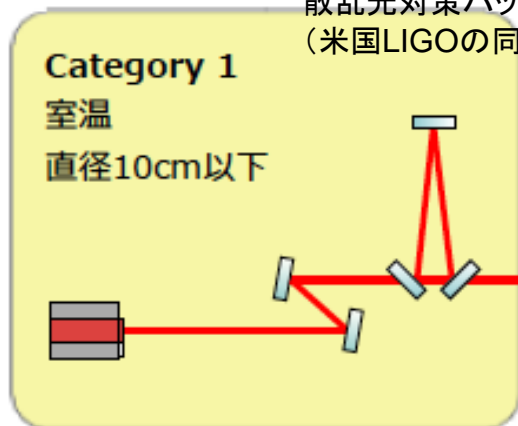
- ・ 補助光学系製造、性能評価（バッフル、望遠鏡など）
- ・ 高性能ミラー製膜
- ・ その他についても、かぐら協力キックオフ会議を開いて検討予定



散乱光対策バッフル  
(米国LIGOの同等物)

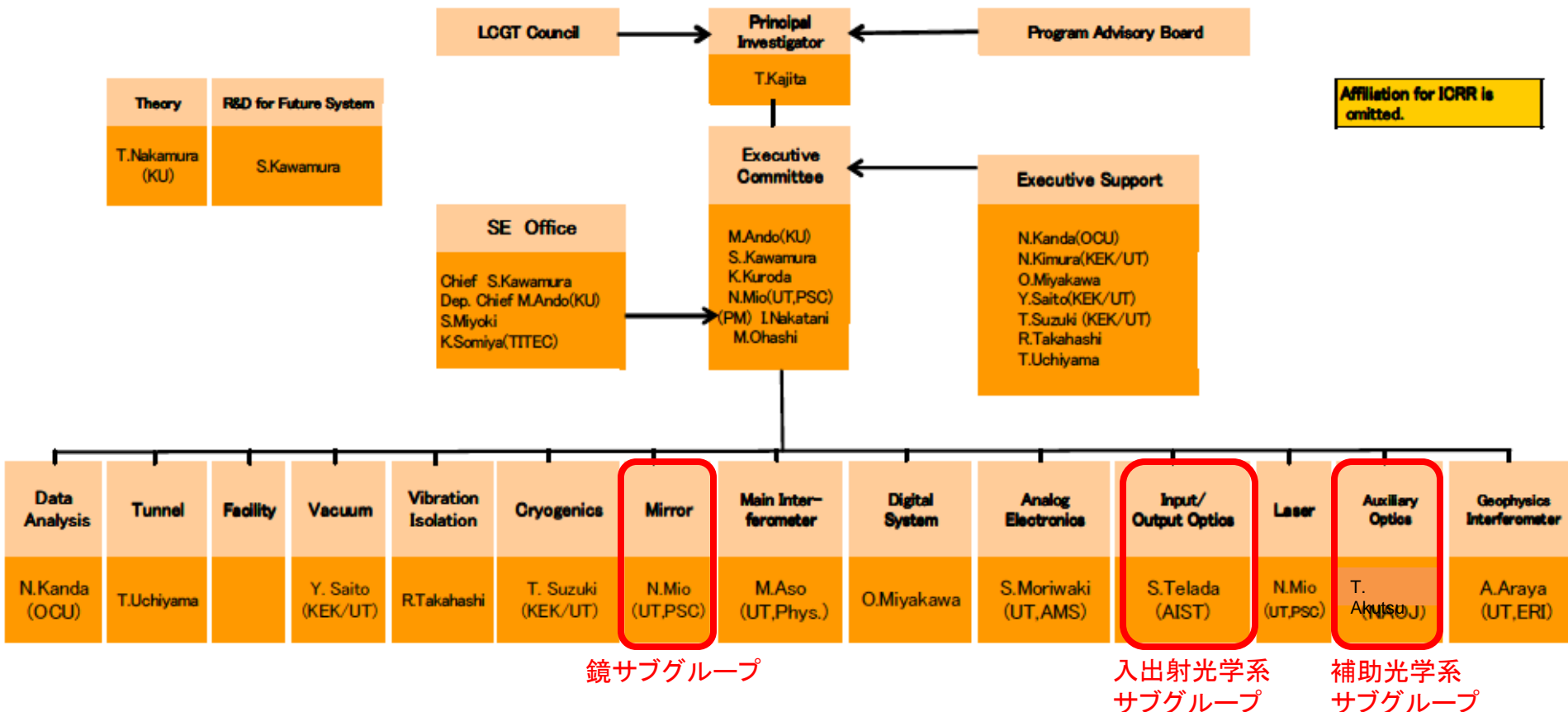
他、多数

透過光モニター望遠鏡  
(米国LIGOの同等物)



# KAGRA組織図

東大宇宙線研、KEK、国立天文台、その他多数の機関による協力体制



赤枠: 光学素子、光学機器を担当するサブグループ



# KAGRA開発のロードマップ

2012年4月 神岡トンネル着工

2014年3月 トンネル掘削完了、KAGRAインストール開始

2015年3月 真空槽、クライオスタットの設置完了

真空槽が設置されたところから  
光学系もインストールしていく

2015年11月末 iKAGRA観測実施  
※initial KAGRAでは感度を問わない。

2016年1月 bKAGRAへアップグレード開始

※baseline KAGRA

bKAGRA中央部のみでリサイクリング技術動作確認

2016年10月 サファイア鏡導入でbKAGRA最終形態へ。まだ常温での動作検証

2017年9月 bKAGRA低温化開始

2018年9月 bKAGRA本格観測開始

大きく分けて2回、コンポーネントのインストールの機会がある。  
iKAGRA用とbKAGRA用とを区別し、それぞれのデッドラインに間に合うように  
製作していく。

大型低温  
重力波望遠鏡



# KAGRAにおけるATCの位置づけ

東大・宇宙線研究所  
LCGTホスト機関

KEK、東大理学部、東工大ほか多数

国立天文台  
重力波P推進室

阿久津

兼任

ATC

MEショップ

・デザイン設計解析、加工技術

光学素子開発

・ミラーIBS、Zygo形状測定技術



CLASP主鏡300mm保持機構

KAGRA防振系開発

KAGRA補助光学系開発

- ・主鏡200mmの防振テレスコープ
- ・防振された散乱光バッフル

KAGRA高性能ミラー評価

- ・キロメートル級の曲率半径測定
- ・コーティング

KAGRA高感度化にむけた先端技術開発

シナジー

# 建設にかかわるヒトとモノ

グループ名	チーフ	主要プロダクツ	主な利用設備
鏡	三尾 (東大工)	22 ~ 25cm径のミラー (Silicaおよびサファイア)	(メーカー)
入出射光学系	寺田 (産総研)	Input Mode Cleaner, Output Mode Cleaner, Input/Output Mode Matching Telescopes, etc...	未定、
補助光学系	阿久津 (NAOJ/ATC併任)	散乱光対策用の大型バツフル類(Φ600~800程度)、 Beam Reducing Telescope(長さ1m程度)、etc	未定→ATC希望
防振系	高橋 (NAOJ、ICRR出向中)	大型サスペンションシステム(20機ほど)	ICRR明野、TAMA300、一部イタリア工場
冷却系/冷却ペイロード	鈴木 (KEK)、山元 (ICRR)	冷凍機4台、 冷却部に設置される鏡の支持機構(ペイロード)、 etc	ICRR柏(準備中)

国立天文台先端技術センターの KAGRA への支援について (要望)

日頃より宇宙線研究所、及び重力波 KAGRA (旧名 LCGT) プロジェクトのことについていろいろお世話になっており、感謝しております。

KAGRA プロジェクトは予算要求時より、国立天文台および高エネルギー加速器研究機構と宇宙線研究所が、3 機関覚書を取り交わして開発研究を推進してきました。建設が認められた後は、国立天文台から複数名が宇宙線研究所に出向してきており、また国立天文台においても重力波プロジェクト推進室を中心として様々な協力をお願いしてきました。特に、阿久津智忠助教には KAGRA 周辺光学系 (メインミラーおよび入出射光学系を除くすべての光学系) のチーフとして、高橋竜太郎助教には宇宙線研に出向していただき防振装置のチーフとして活躍していただいているところです。

昨年末のトンネル掘削工事の入札で施工会社が鹿島建設に決まり、ついに着工することとなりました。既に真空系や低温系の設計・製作が並行して行われてきましたが、今後はレーザー干渉計の光学設計および光学部品の製作を最重要課題の一つとして進めていきます。この段階では国立天文台の誇る光学技術が KAGRA プロジェクトの成功のために必須であり、KAGRA 光学系の重要部分の設計・製作について、重力波プロジェクト推進室のみならず、開発実験環境が整備され優秀な人材を持つ先端技術センターからもご支援いただきたいと考えています。是非、今までにも増して国立天文台のお力をお借りしたいと考えています。

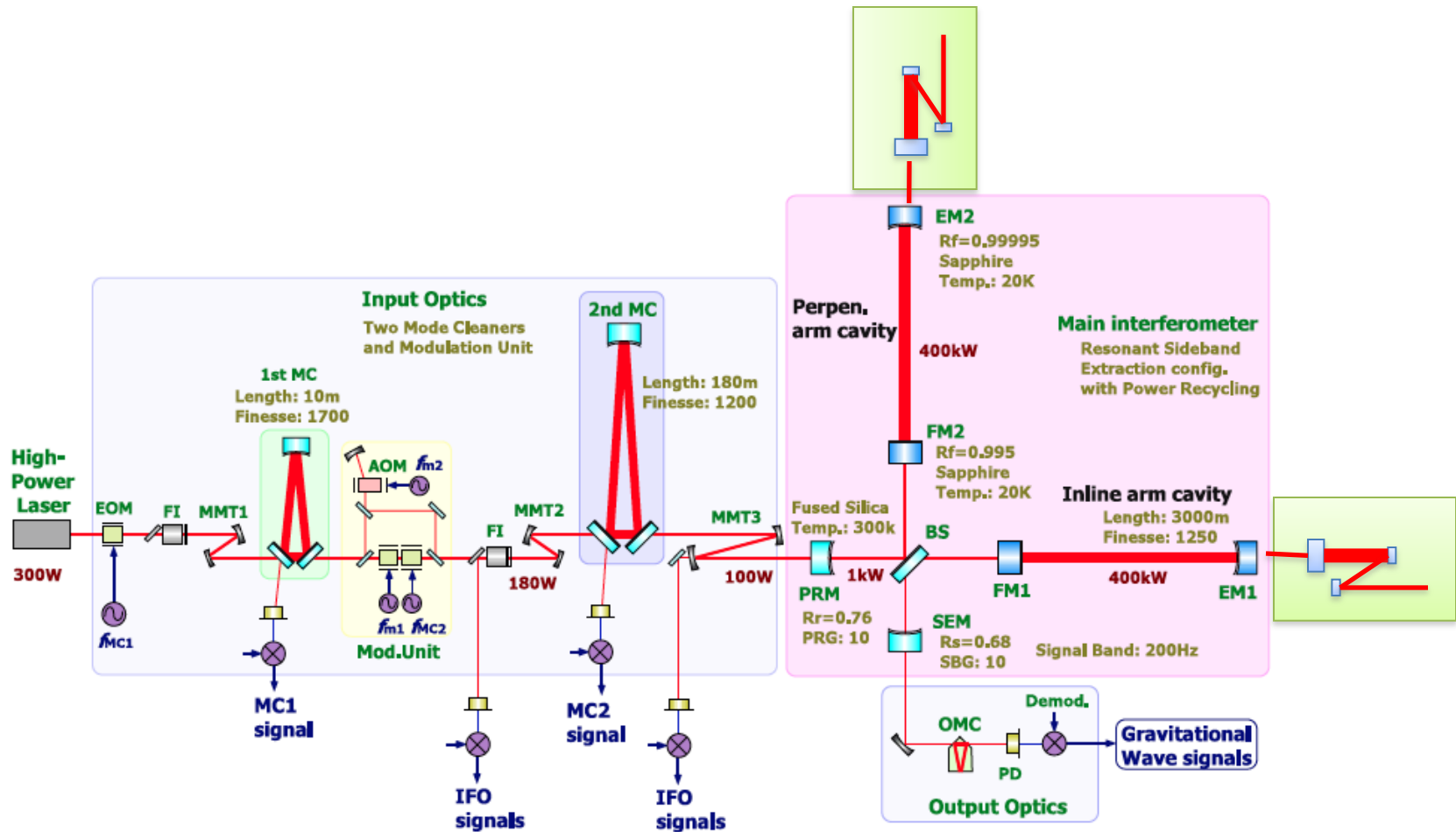
ご検討のほどよろしく申し上げます。

東京大学宇宙線研究所長

•財務・企画合同委員会 (June 29, 2012, KAGRA プロジェクト代表  
NAOJ)

梶田 隆章

# 参考: KAGRA光学系



# 補足資料

# お知らせ

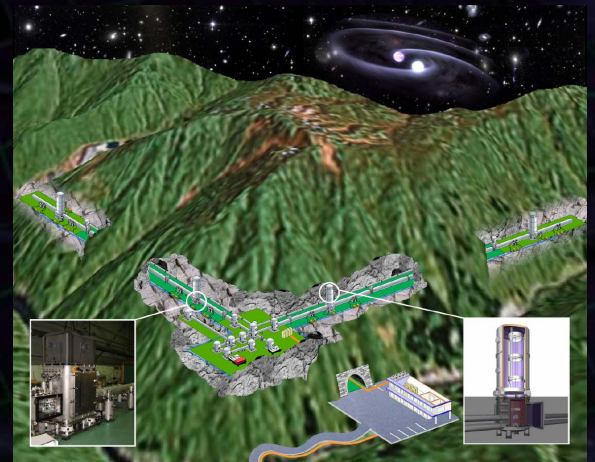
## ・大型低温重力波望遠鏡 LCGT

(Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

に愛称がつけました。

かぐら KAGRA

- 一般公募された候補の中から  
有識者による選定委員会で決定  
(選定委員長: 作家・小川洋子さん)
- かぐら (神楽): 神に奉げる歌や踊り。
- Acronymではないが、  
KA (Kamioka) + GRA (Gravitational Wave Antenna)  
の意味合いもある。



# 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, 高エネルギー天体現象

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



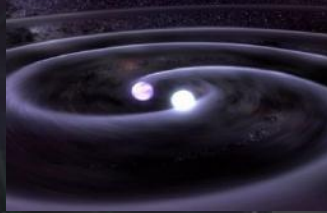
# 宇宙重力波望遠鏡のターゲット

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



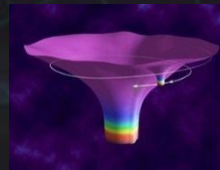
定常的・準静的な自転・公転運動

ブラックホール



巨大ブラックホールの合体

EMRI

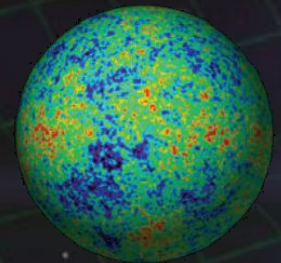


準固有振動

初期宇宙

多数天体の重ね合わせ

背景重力波



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

# 第1世代 重力波検出器

検出の試み：1960年代より行われる

2000年前後より、大型干渉計型検出器が観測を開始

レーザー干渉計型：5台, 共振型検出器：3台



⇒ 国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ  
→ 科学的成果（上限値, 理論モデルへの制約など）

連星中性子星合体イベント：50kpc~20Mpcの観測レンジ  
→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

# 本格的な天文学

現在の検出器 --- 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 ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$  event/yr)

⇒ 約1桁感度を向上した 第2世代の重力波望遠鏡

高感度化→より多くの銀河をカバーする

(重力波の振幅)  $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



感度が10倍向上 → イベントレートは  $10^3$ 倍

得られるサイエンス

Initial LIGO 1年間の観測

~ Advanced LIGO 9時間の観測



第2世代望遠鏡では、検出頻度  $\sim 10$  event/year

# 第2世代 重力波望遠鏡

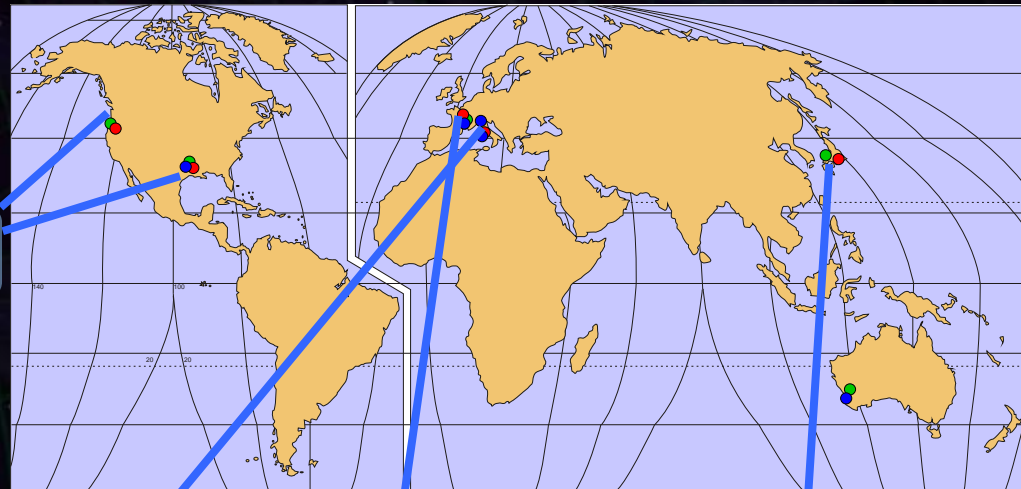
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 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)



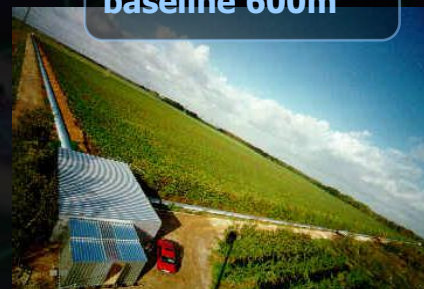
LIGO-Australia  
in proposal



LIGO-India  
in proposal



Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m



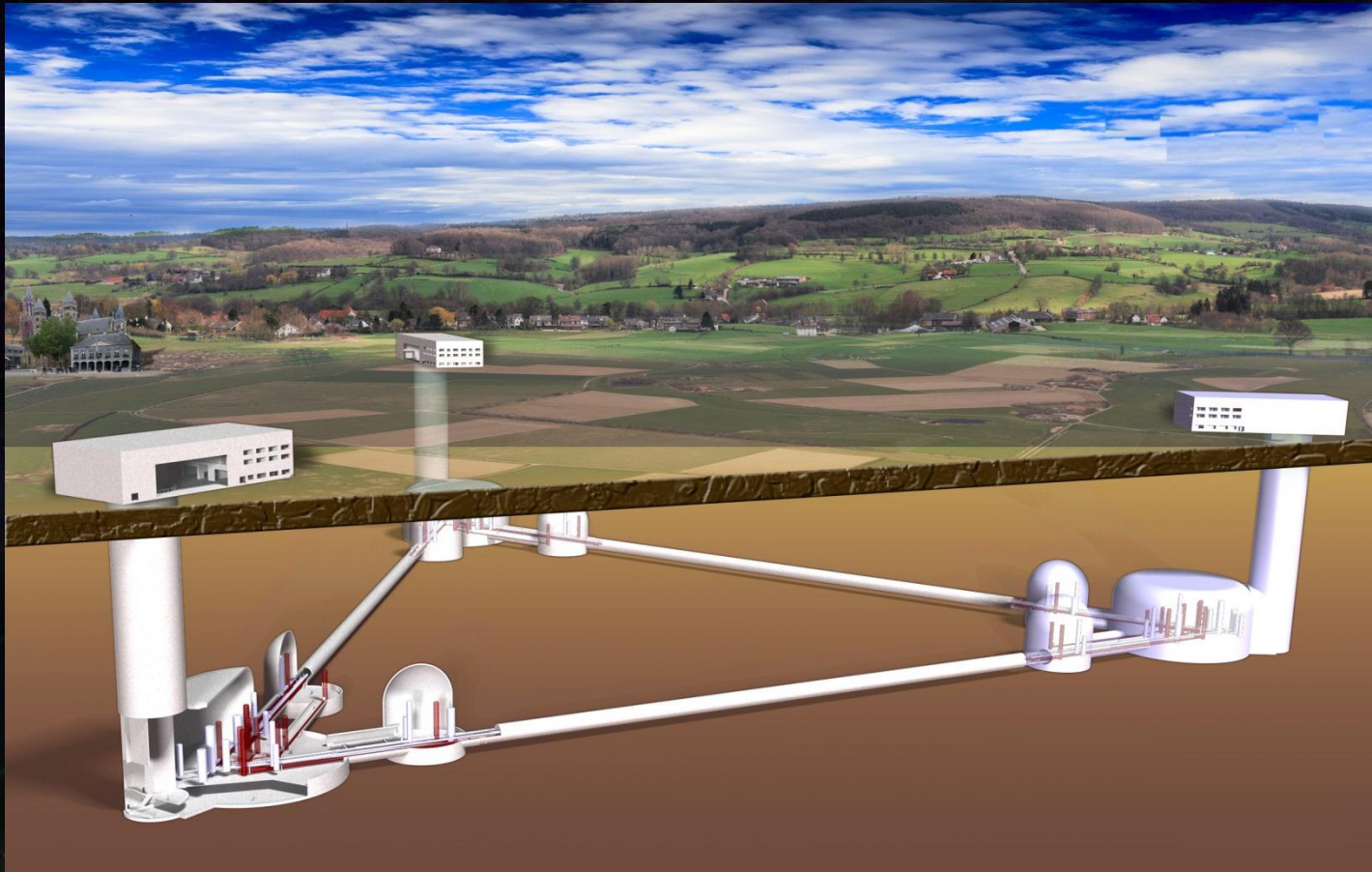
KAGRA (JPN)  
baseline 3km



# 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, 変更の可能性はある。

# KAGRAの意義

## • 重力波の検出と重力波天文学の創生

- 1年間の観測で複数回の重力波信号の検出が期待できる。  
→ 重力波天文学の幕開け, 相対性理論の検証.
- 国際観測網における重要な拠点  
波形, 偏波などの情報 → 天体现象の情報.  
波源の位置の特定 → 電磁波観測も含めた波源の理解.

## • 先進的な干渉計技術の実証

- KAGRAの特徴 : 低温干渉計, 地下サイトに設置.  
→ 第3世代望遠鏡 (Einstein Telescope) に必須の技術.  
⇒ KAGRAには、第2.5世代の望遠鏡としての役割もある.

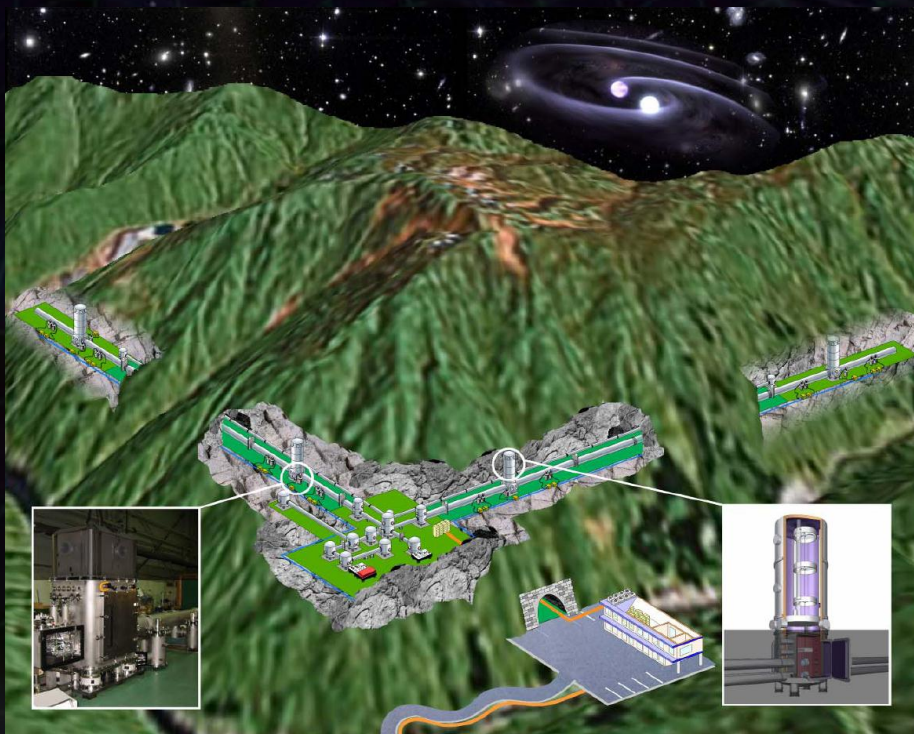
# LCGT と DECIGO

## LCGT (~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

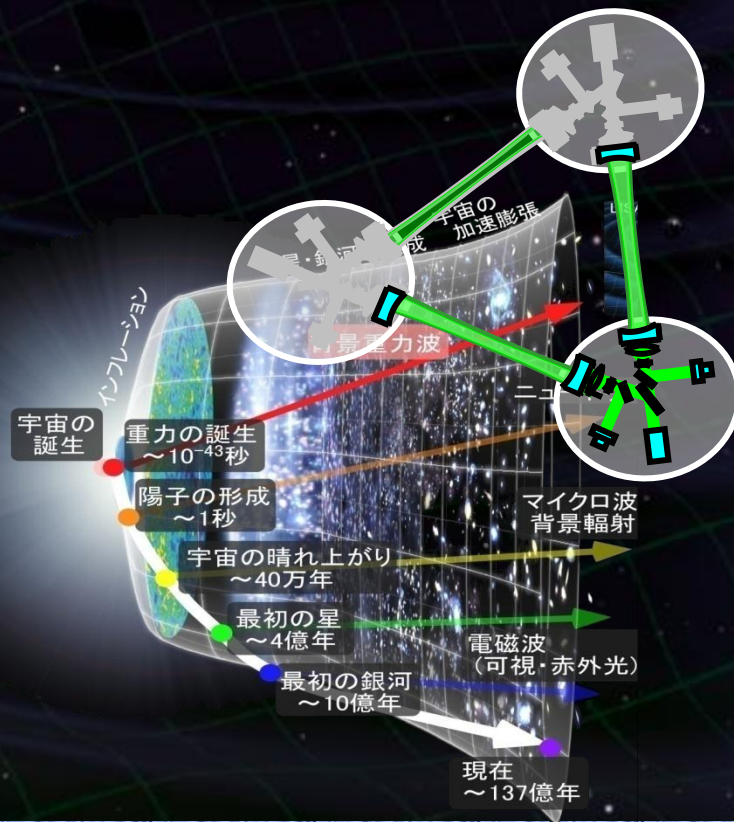


## DECIGO (~2027)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開





# 重力波天文学のロードマップ

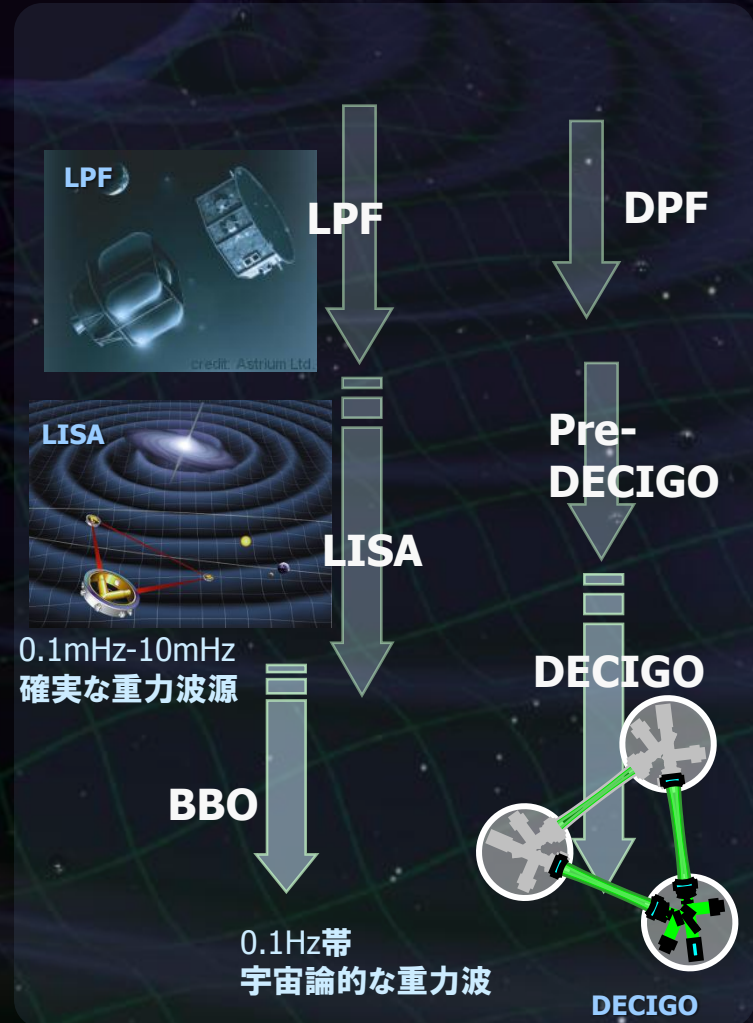
## 地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



## 宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測



# DECIGO/DPFとの関係

• 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.
- 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.

• 宇宙ミッション(DPF/DECIGO)だからこそ重力波分野に参加している人たちも多い (JAXA他研究機関, 学生). 重力波分野はこれから大きくなっていくべき分野である. KAGRAを進めるという理由でそれらの人々を切り捨て、重力波分野を縮小させるのでは本末転倒である.

⇒ 適切なリソースの配分の元での継続が重要.