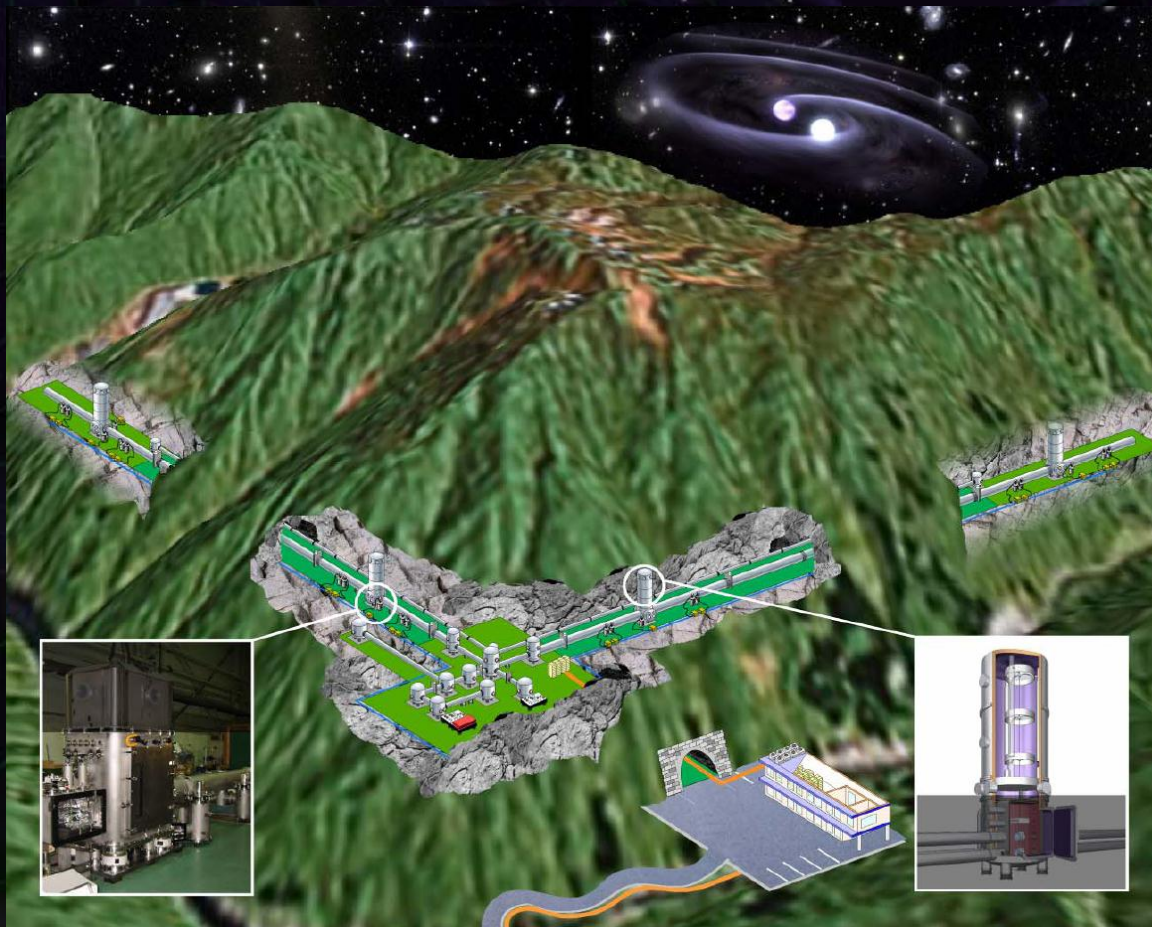


重力波観測の現状

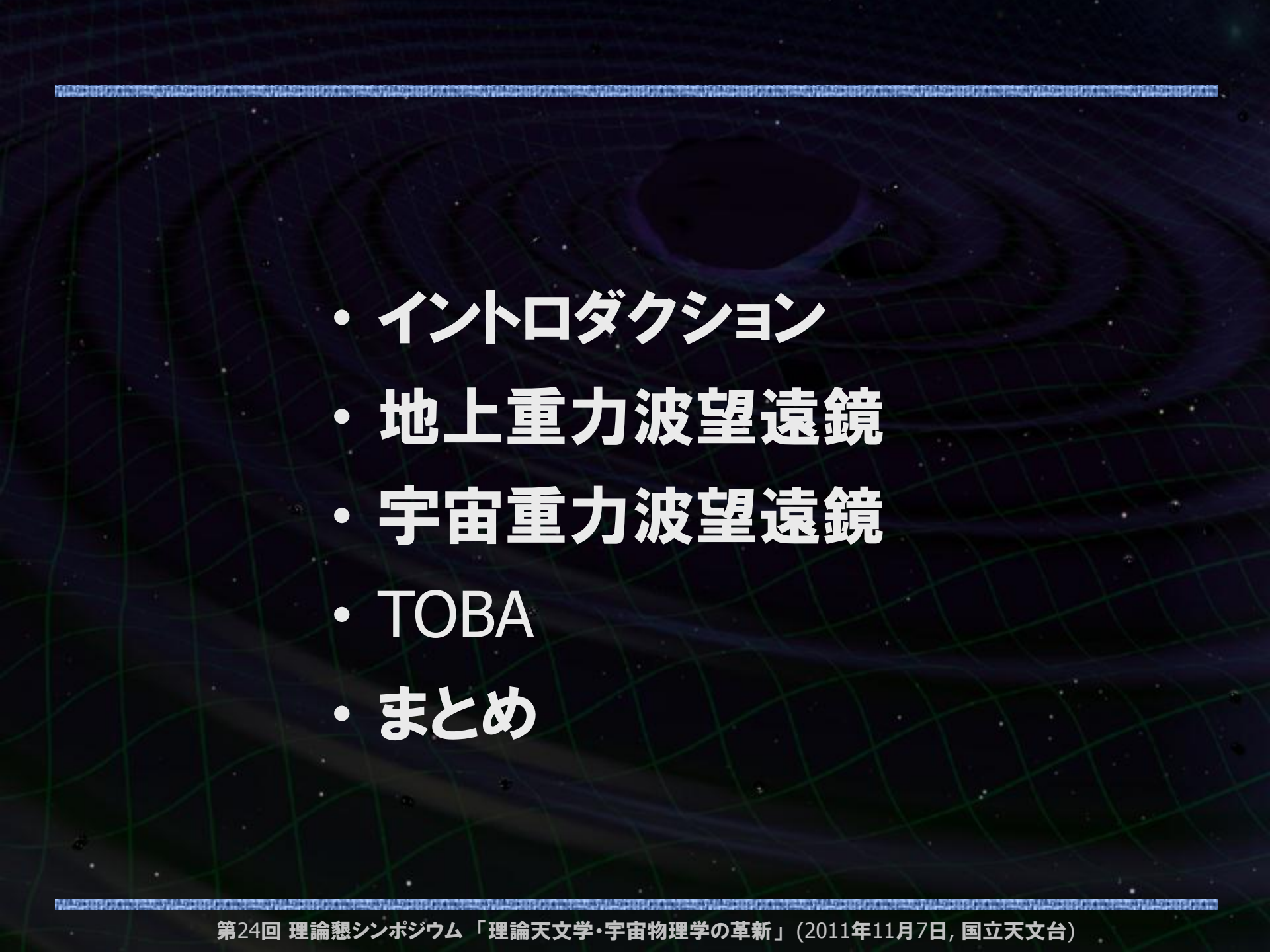


安東 正樹
(京都大学 理学系研究科)

On behalf of
the LCGT Collaboration,
And DECIGO working group

今回含まれない話

- CMB Bモード
 - パルサータイミング
 - 共振型アンテナ
- ... その他もろもろ

- 
- イン트로ダクション
 - 地上重力波望遠鏡
 - 宇宙重力波望遠鏡
 - TOBA
 - まとめ

イントロダクション

重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

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

パルサー

超新星爆発

連星合体

ブラックホール

初期宇宙

軟ガンマ線リピーター

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

EMRI

準固有
振動

背景重力波

電磁波
ニュートリノ
高エネルギー宇宙線

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



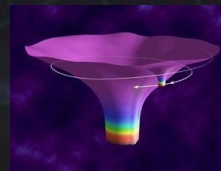
定常的・
準静的な
自転・
公転運動

ブラックホール



巨大ブラック
ホールの合体

EMRI

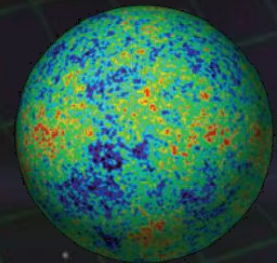


準固有振動

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

本格的な天文学

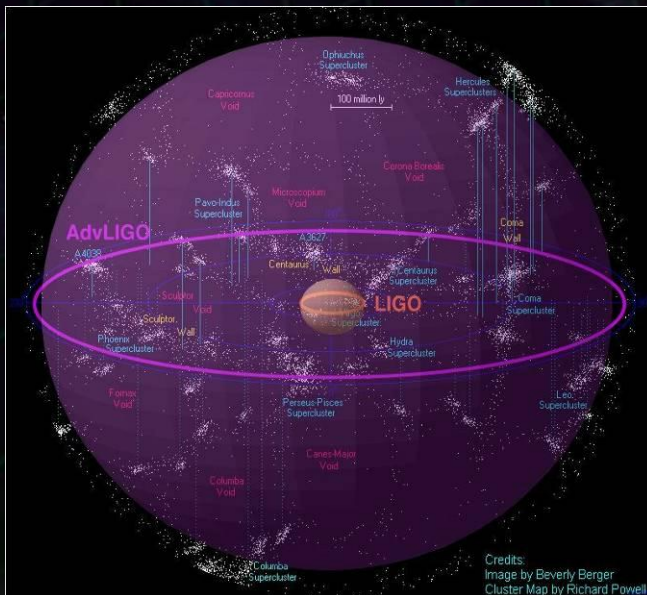
現在の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

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

⇒ 次世代の重力波望遠鏡

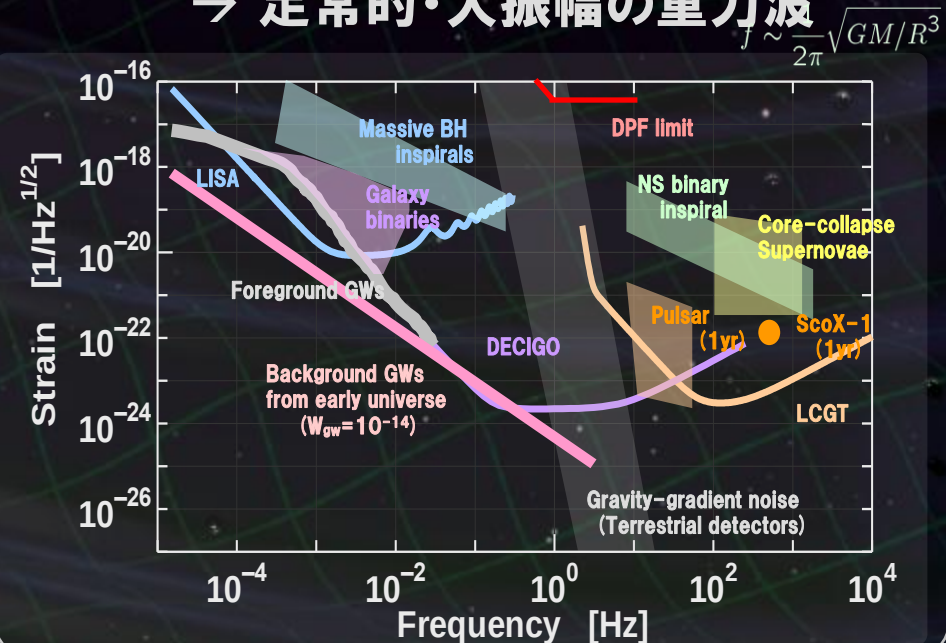
高感度化

→ より多くの銀河をカバーする



観測帯域を広げる

→ 定常的・大振幅の重力波



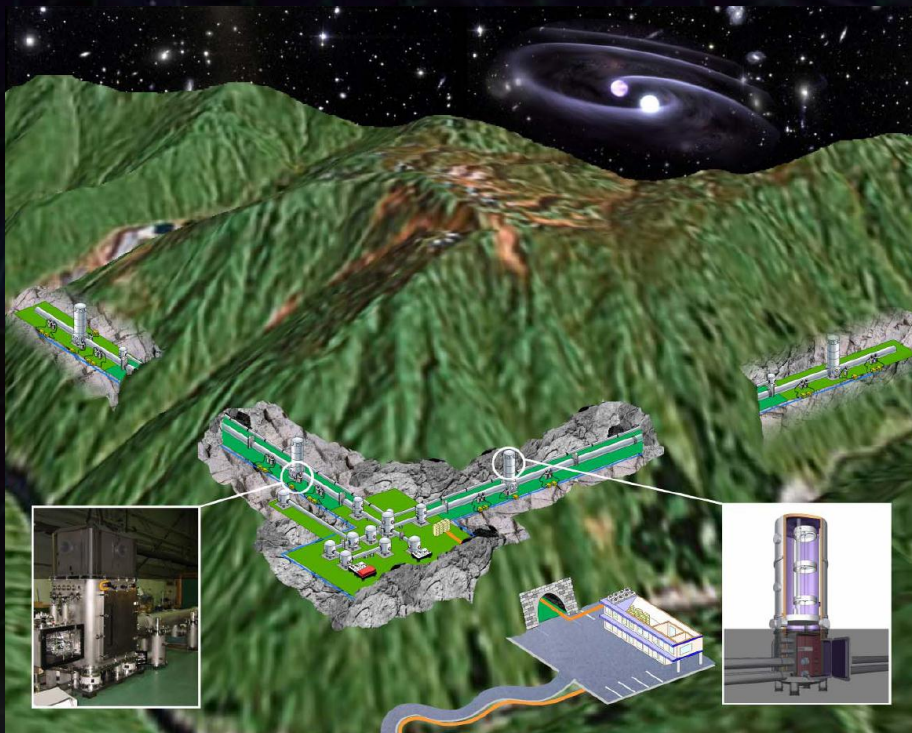
LCGT と DECIGO

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

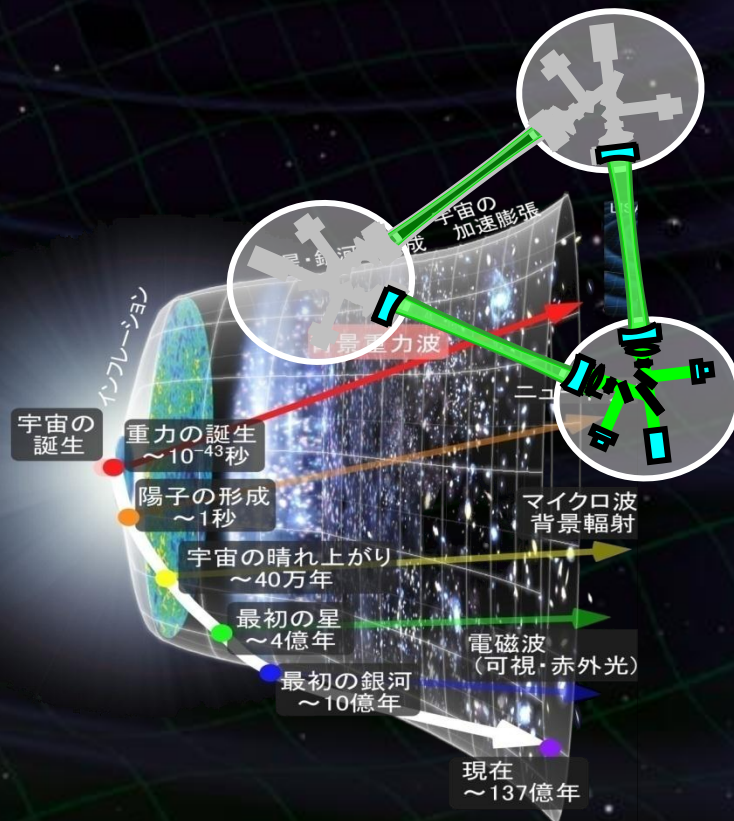


DECIGO (~2027)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

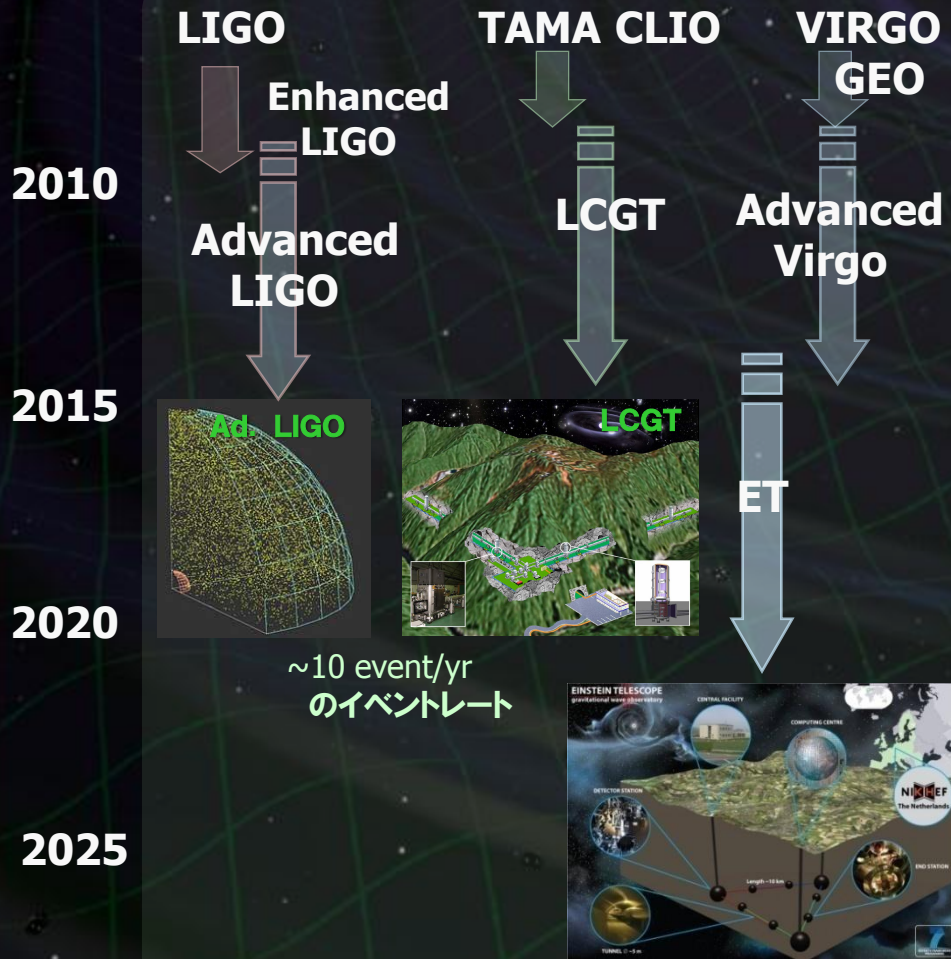
目標: 重力波天文学の展開



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





地上重力波望遠鏡

- LCGT, aLIGO, など -

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 ~ 10 event/year

第2世代 重力波望遠鏡

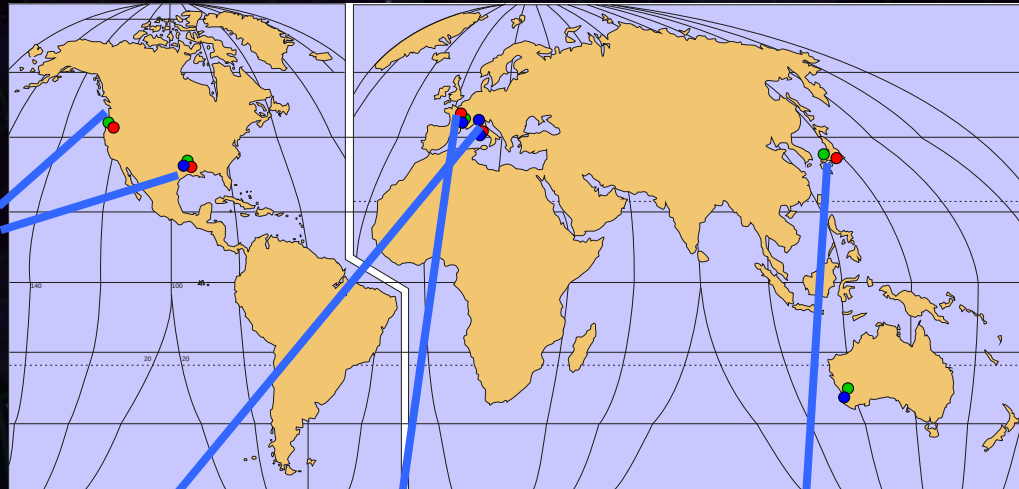
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 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)



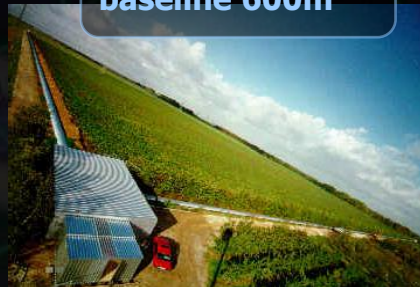
LIGO-Australia
in proposal



LIGO-India
in proposal



Adv. VIRGO (ITA-FRA)
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)
baseline 600m



LCGT (JPN)
baseline 3km

LCGT

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

LCGT サイト

岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

Facility of the Institute of Cosmic-Ray Research (ICRR), Univ. of Tokyo.



Neutrino

Super Kamiokande, Kamland

Dark matter

XMASS

Gravitational wave

CLIO, **LCGT**

Geophysics

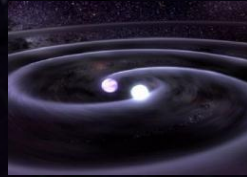
Strain meter

- 220km away from Tokyo
- 1000m underground from the top of the mountain. (Near Super Kamiokande)
- 360m altitude
- Hard rock of Hida gneiss (5 [km/sec] sound speed)

重力波望遠鏡の高感度化

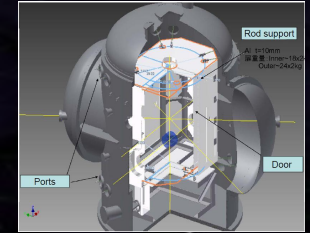
・重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



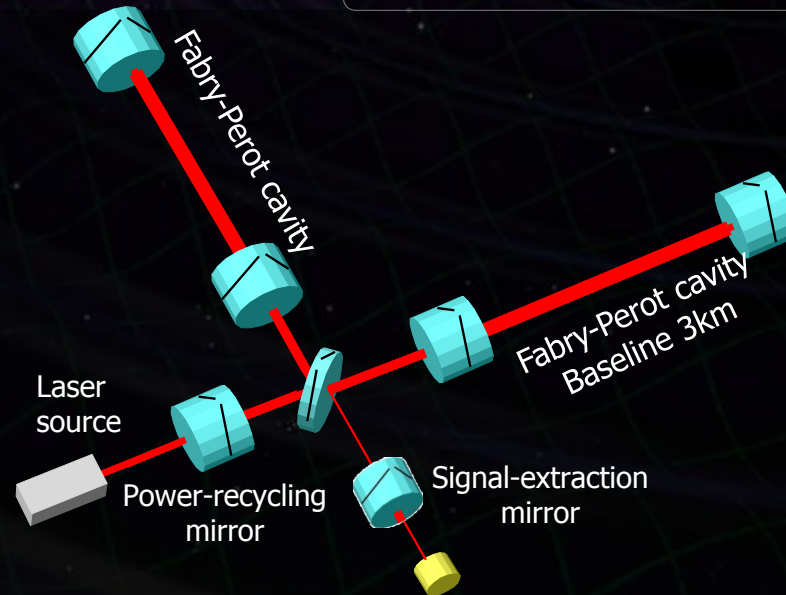
・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



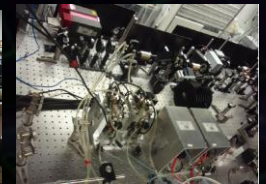
・地面振動の影響

静寂な地下サイト
高性能防振装置



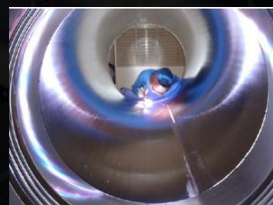
・光の量子雑音

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



第2世代 重力波望遠鏡

•aLIGO

- 基線長 4km、施設・真空系: そのまま利用
- 光学系・防振系・制御系など: ほぼ取り換え
- スクイーミングのテスト実験
6dBのSqueezing → 感度向上を目指す.

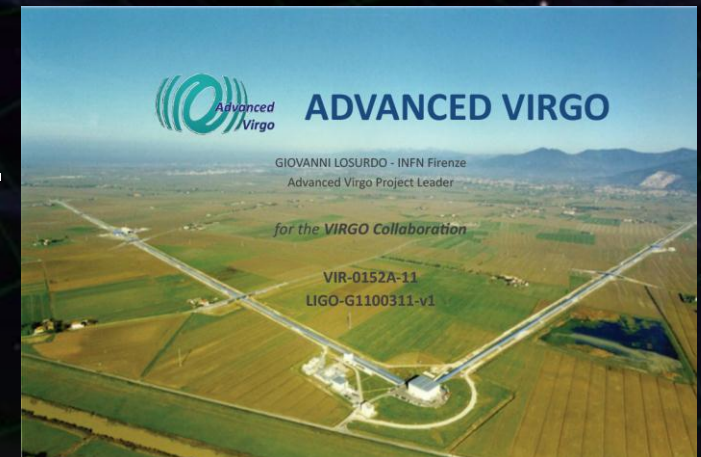
インストール作業進行中

•Advanced VIRGO

- 基線長 3kmのまま, 干渉計構成変更(RSE).
- 光源の変更 → ファイバーレーザー.
- 鏡の熱補償, 出射光学系変更.

11月中旬インストール開始

David Shoemaker, LV meeting March 2011



G. Losurdo LV meeting March 2011

第2世代 重力波望遠鏡

Hartmut Grote, LV meeting March 2011

- GEO-HF: GEOのアップグレード

- 基線長 600m → 高周波数感度を向上.
- 高出力光源, スクイーミング
→ 最大3.5dBの効果確認.

AstroWatch進行中



- LIGO-Austreria, LIGO-India

- aLIGOの1台を移設 → 角度分解能を上げる.

- Established in August 2009 to coordinate the Indian GW community to participate in GW research!
- Funding received for a 3m prototype interferometer at the Tata Institute for Fundamental Research.



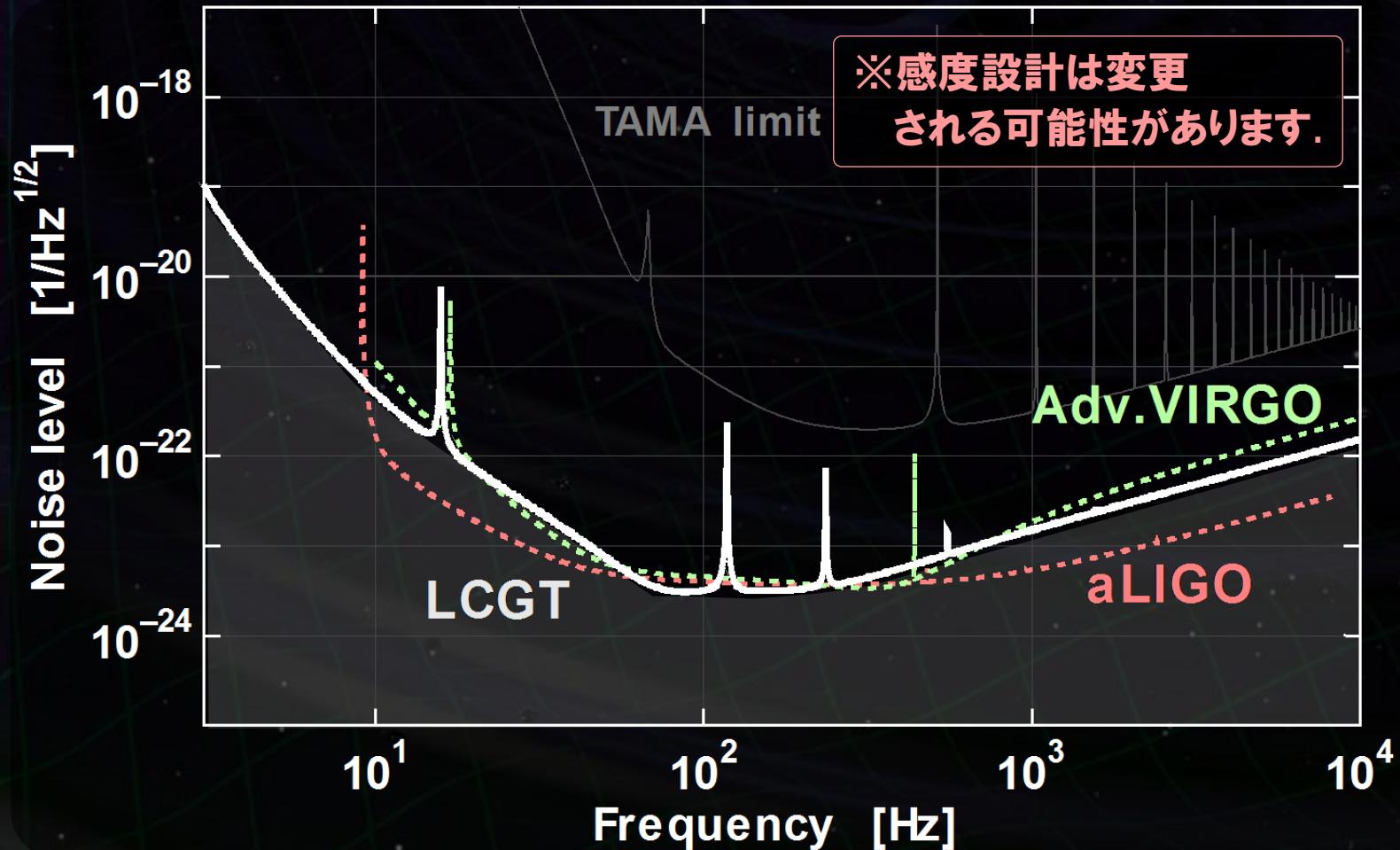
LCGTの感度限界

- 主要な雑音源で決まる限界感度
- aLIGO や Ad.VIRGOと同等



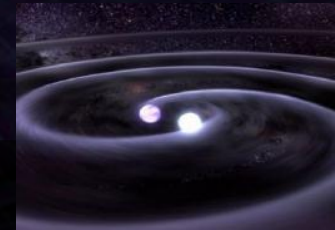
国際観測網を形成

年間数回以上の重力波信号検出



LCGTの観測確率

第一目標: **連星中性子星合体**からの重力波の検出



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 280 Mpc

(SNR 8, 最適方向・偏波)

銀河の個数密度:

$$\rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$

R. K. Kopparapu et.al.,
ApJ. 675 1459 (2008)

銀河あたりのイベントレート:

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

V. Kalogera et.al.,
ApJ, 601 L179 (2004)



LCGTの観測レート **9.8 events/yr**

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

海外望遠鏡との比較

	2 nd -generation detectors		3 rd generation
	aLIGO	Ad. VIRGO	ET
観測開始	~ 2016	~ 2016	~ 2026
サイト	地上 Hanford 2台 Livingstone 1台	地上 Pisa 1台	地下 3 台
基線長	4 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

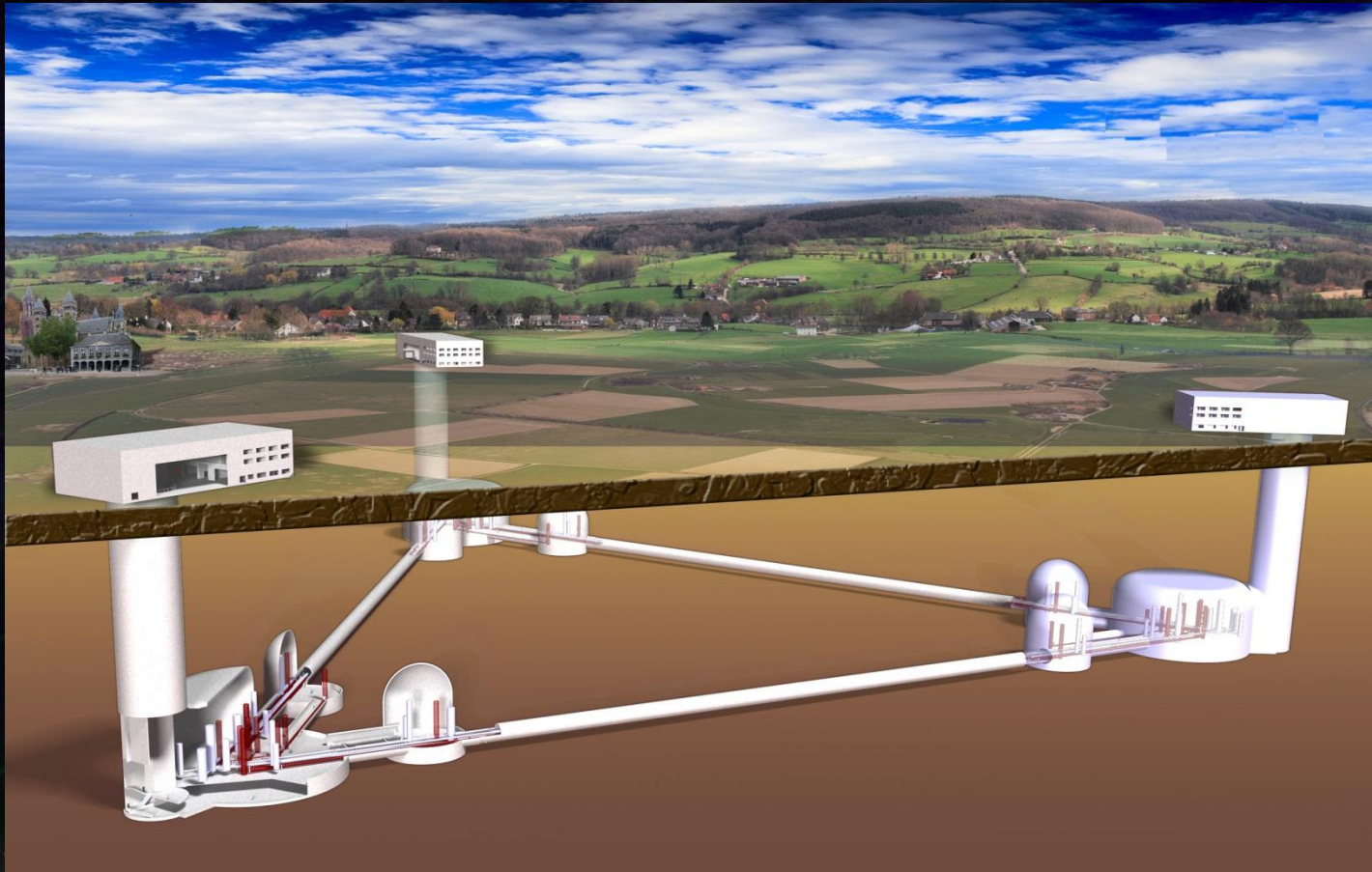
(*1) 連星中性子性合体现象に対する観測可能距離, 最適方向, 最適偏波, SNR>8.

(*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。

第3世代 重力波望遠鏡

3rd-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



国際協力

複数台での同時観測の意義

(Ad. LIGO, Ad. VIRGOとの同時観測)

天文的な意義

天球のカバー ← 干渉計は 弱い指向性を持つ

検出された場合 --- 天文的情報の取得

波源の位置, 偏波 の情報の取得

→ 最低3台, 指向性を考慮するとさらに必要

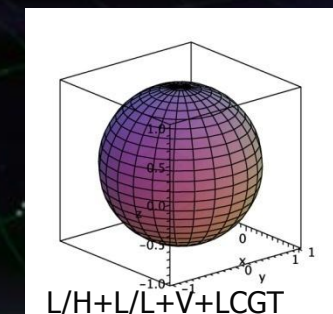
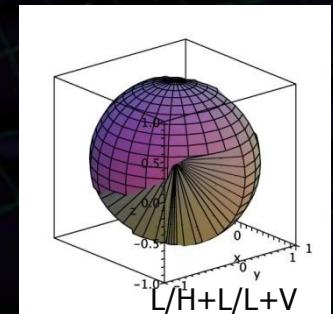
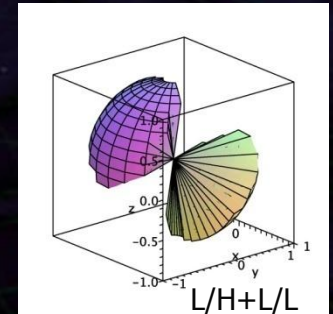
実際上の意義

重力波信号は微弱

→ 多くの Fake event が現れる

複数台での同時検出

→ 検出の信頼度の向上, 偽イベントの除去



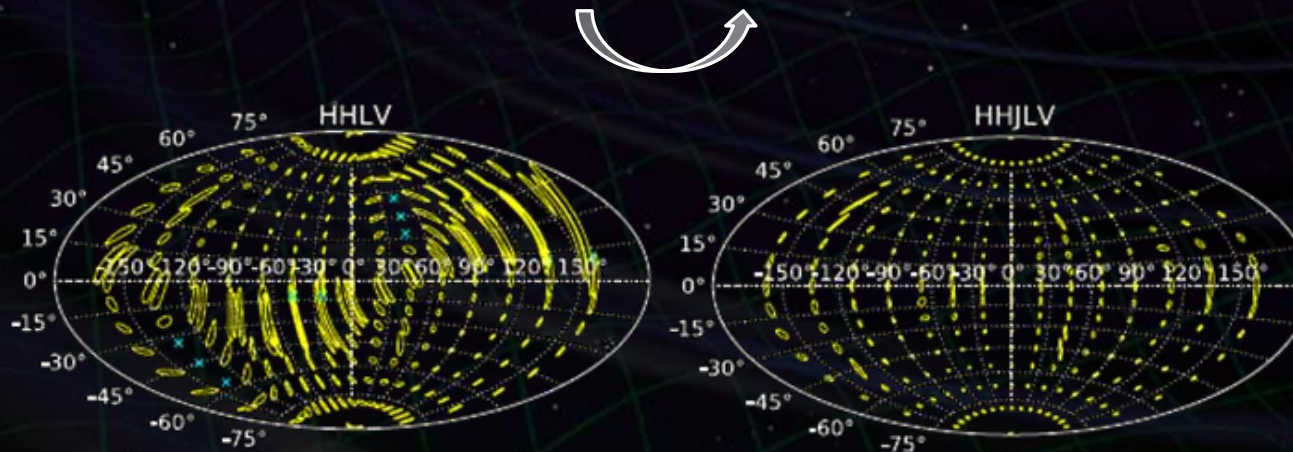
Parameter estimation

Angular resolution for the source

By H. Tagoshi

	LHV	LHVJ	LHVA	LHVJA
average of $\delta\Omega$ [Deg ²]	34.4	7.26	4.20	2.78
median of $\delta\Omega$ [Deg ²]	10.8	3.54	2.20	1.46

H: LIGO--Hanford
L: LIGO--Livingston
V: Virgo, J: LCGT
A: LIGO--Australia



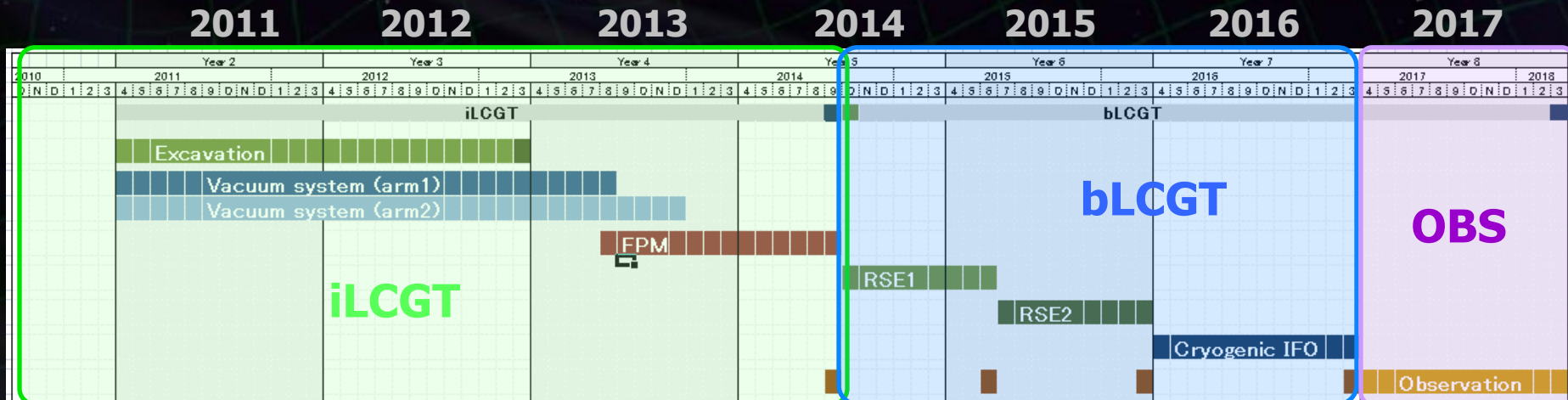
S.Fairhurst
CQG 28(2011) 105021

Adding LCGT to (aLIGO + adv. VIRGO) network
→ Factor ~ 3 -4 improvement in sky area

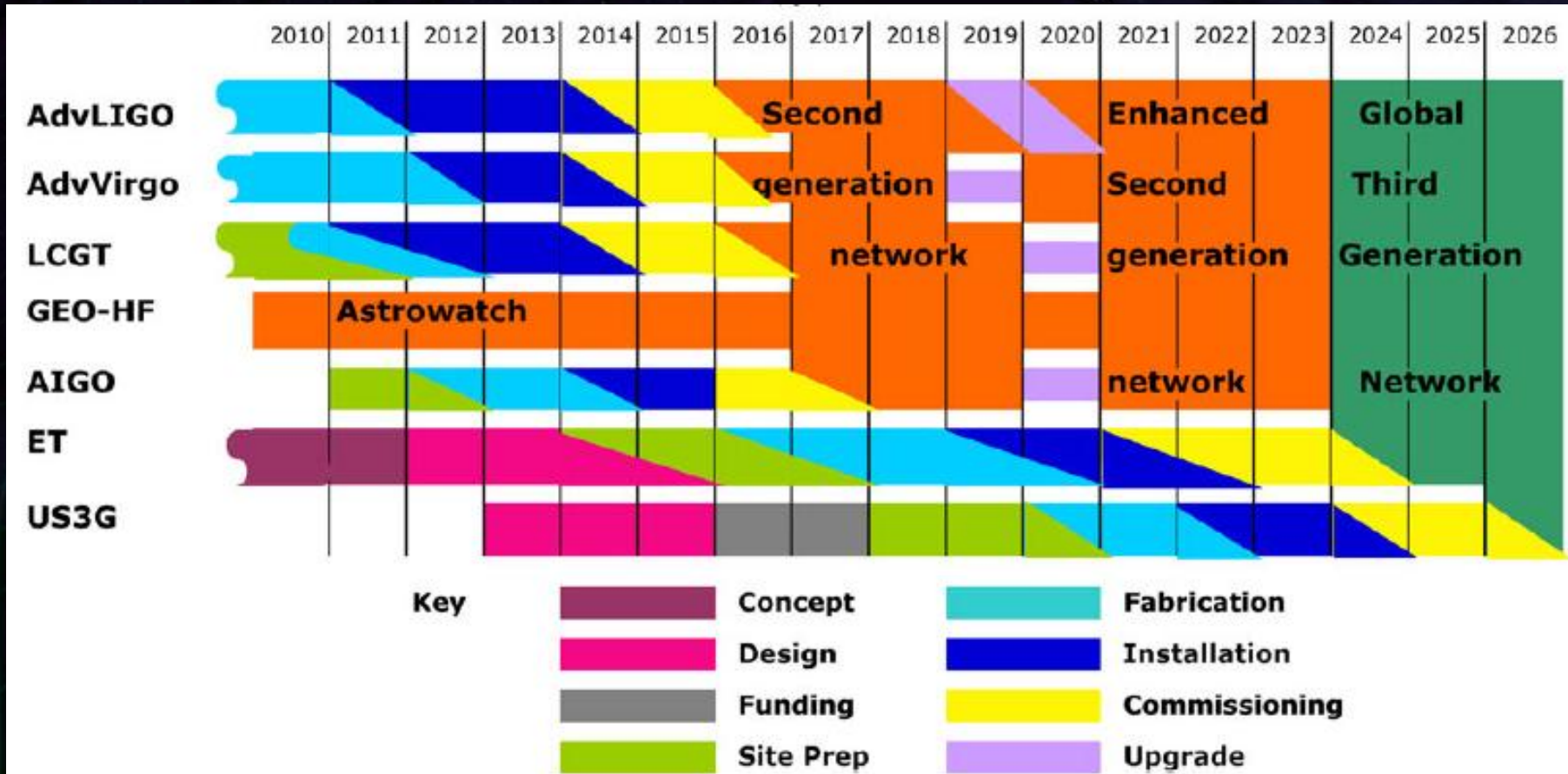
LCGT全体スケジュール

- **iLCGT** : 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
 - 1ヶ月程度の観測運転 → 総合システムとしての動作.
- **bLCGT** : 最終構成での動作
 - RSE, 防振系アップグレード
 - 低温干渉計としての動作.
- **OBS** : 長期間観測運転と干渉計チューニング

※スケジュールは
更新される予定です.



GWIC ロードマップ



Gravitational Waves International Committee Roadmap
<http://gwic.ligo.org/roadmap/>

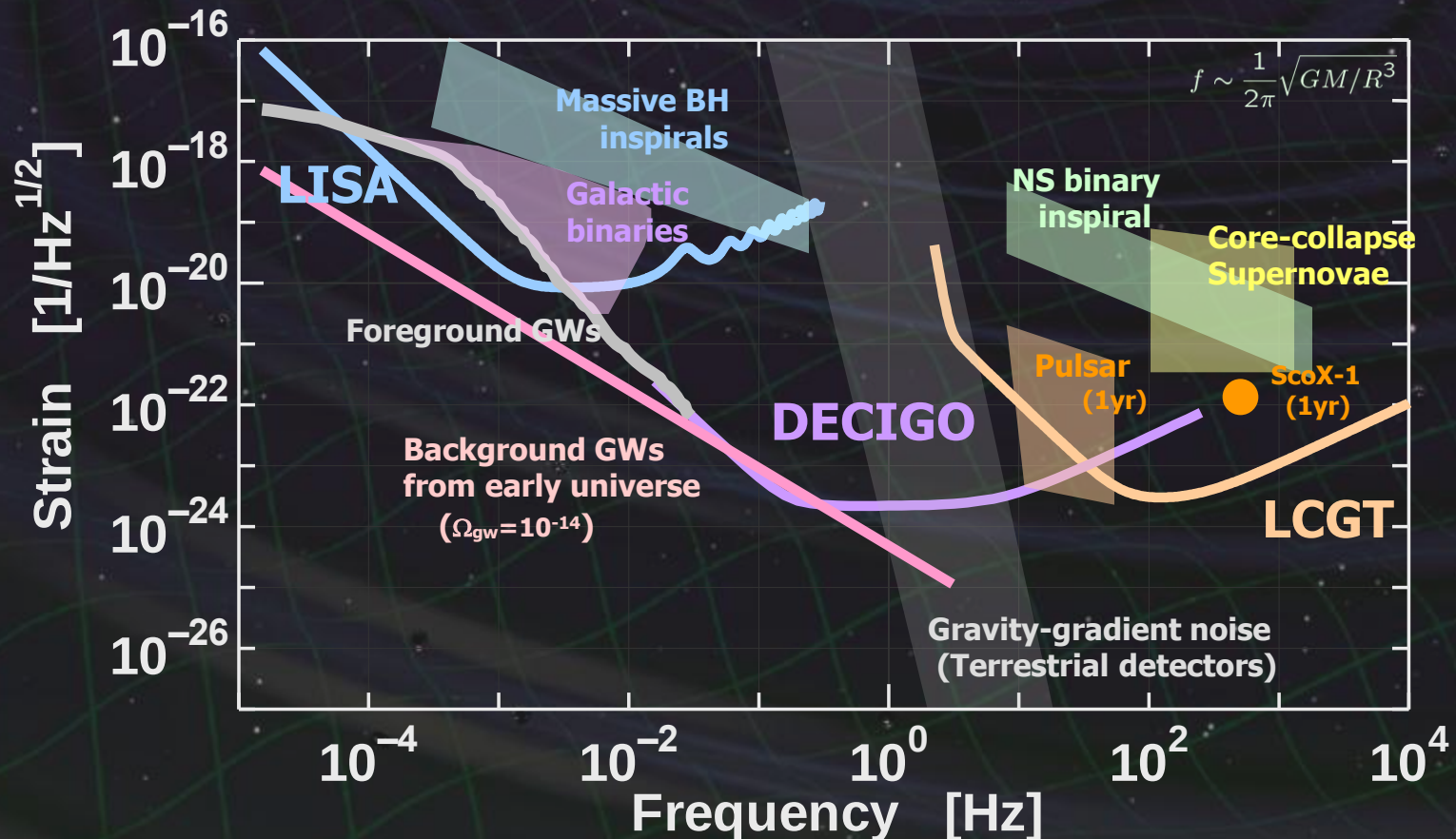
宇宙重力波望遠鏡

- LISA/LPFと DECIGO/DPF -

※Seto+ PRL (2001), Kawamura+ CQG (2011), Ando+ CQG (2010)

Sources and detectors

Ground-based detectors : 10Hz - 1kHz → Neutron star, Supernova, ...
DECIGO/BBO : 0.1 - 1Hz → IMBH, Background GWs, ...
LISA : 1mHz - 0.1Hz → SMBH, Compact binary,...

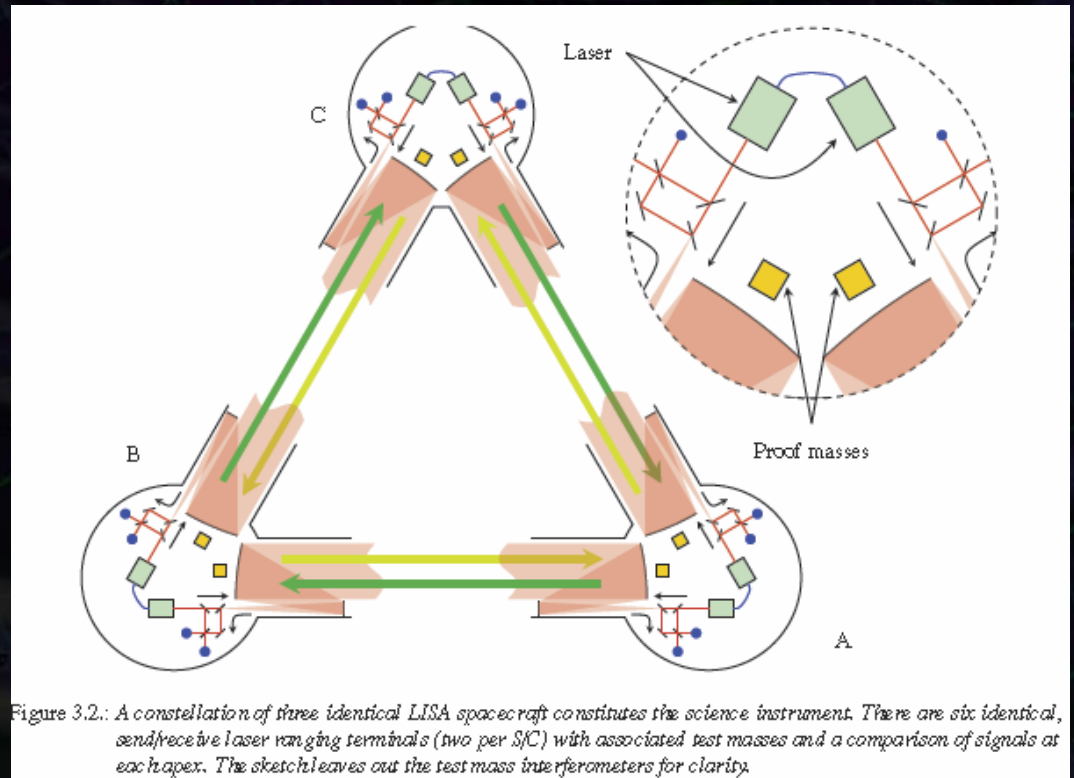
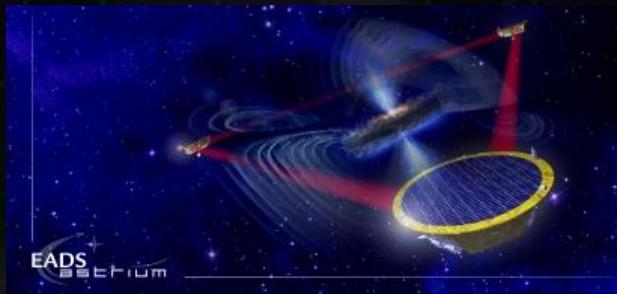
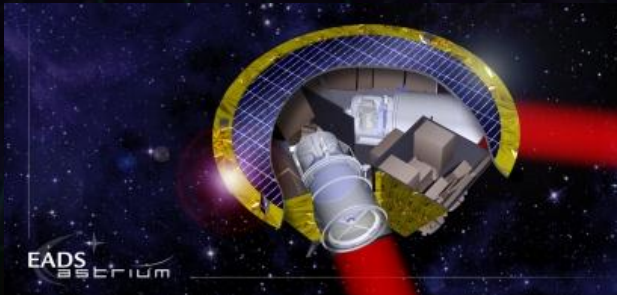


LISA (NGO)

LISA

- 1mHz付近の重力波を観測.
- 2011年春, 国際協力体制の変更
ESA/NASA → European-only mission <http://lisa.nasa.gov/>
- 少し縮小したミッションとして再設計進行中.

LISA web page : <http://sci.esa.int/lisa>



LISA assessment study report (Yellow Book), ESA/SRE (2011) 3, February 2011

LISA Pathfinder (LPF)

LISA Pathfinder

- LISAのための技術実証
重力以外の外力を排除
Differential acceleration of the two TMs
 $3 \times 10^{-14} \text{ m s}^{-2}$ at 1 mHz
Determine best configuration by experiments
雑音モデルの宇宙実証
Allows the projection of the performance of technologies to LISA
- 現状
フライトモジュールの大部分が完成.
Awaiting thrusters and launch lock.
Most of the experiments
are already defined.
- 打ち上げ予定 : 2014年



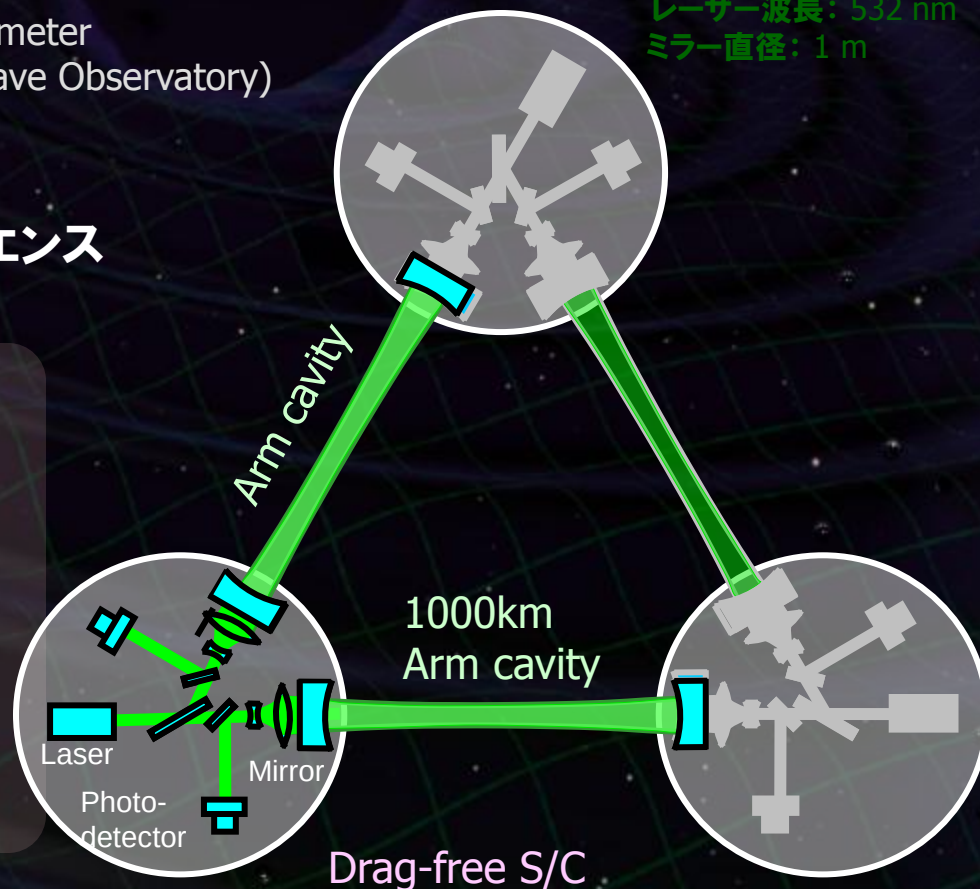
M Hewitson for the LPF team, AMALDI, July 15th 2011

DECIGO (DECI-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (～2027)
→ 他では得られない豊富なサイエンス

宇宙の成り立ちに関する知見
インフレーションの直接観測
ダークエネルギーの性質
ダークマターの探査
銀河形成に関する知見
ブラックホール連星の観測
宇宙の基本法則に関する知見

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



互いに1000km離れた3機のS/C
非接触保持された鏡間距離を
レーザー干渉計によって精密測距

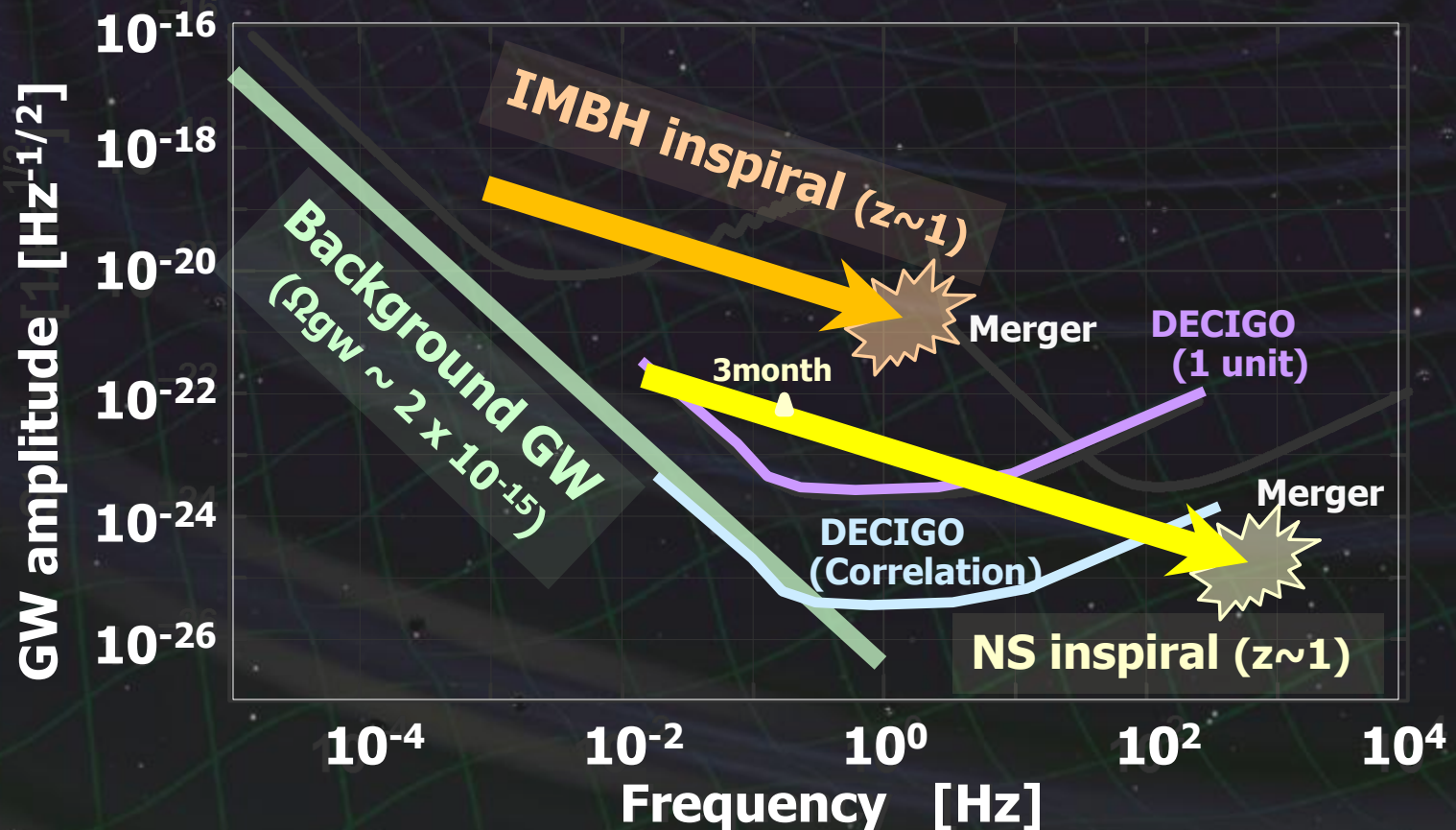
太陽公転軌道
最大4ユニットで相関をとる

Targets and Science

IMBH binary inspiral
NS binary inspiral
Stochastic background



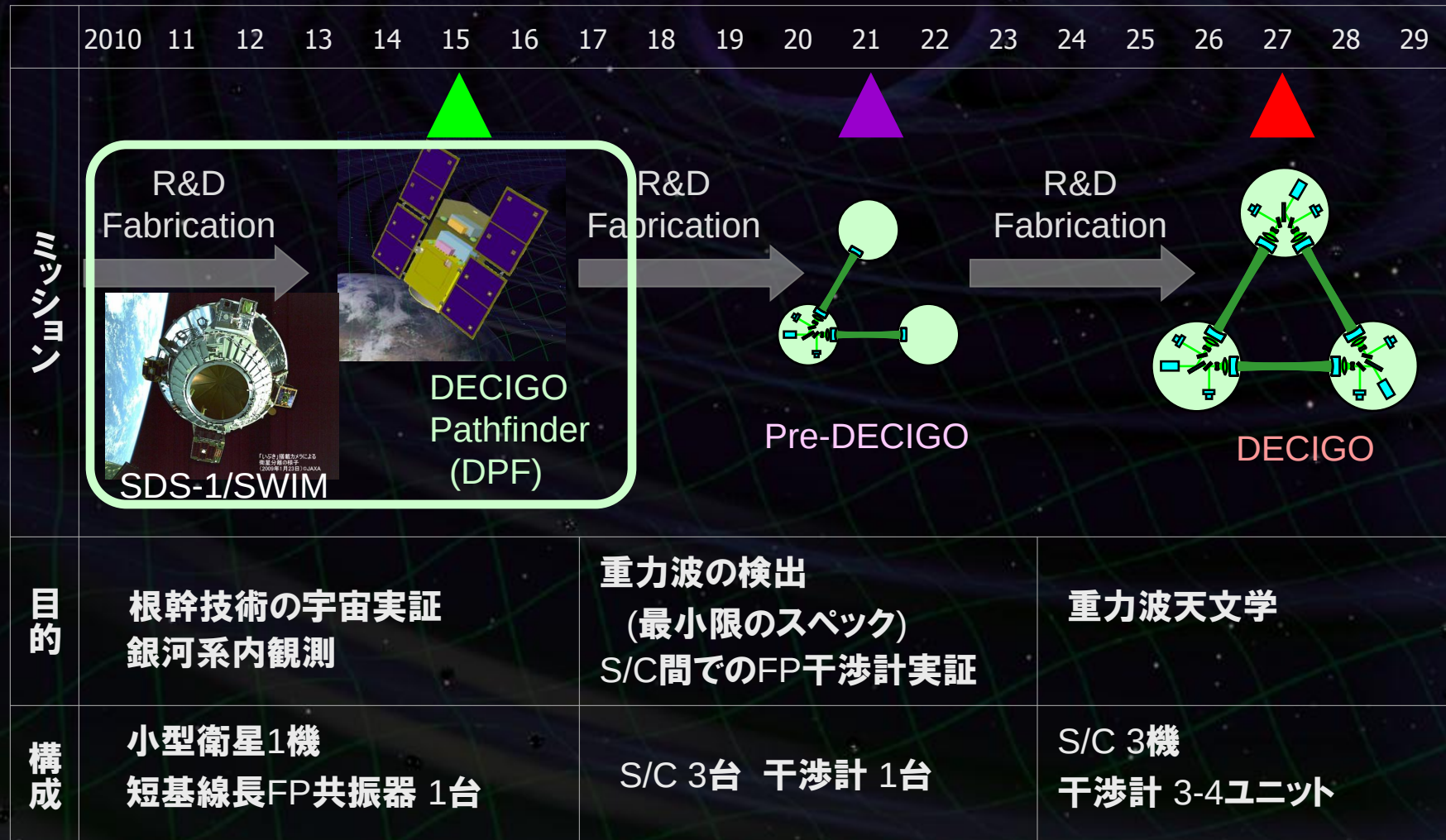
Galaxy formation (Massive BH)
Cosmology (Inflation, Dark energy)
Fundamental physics



DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura

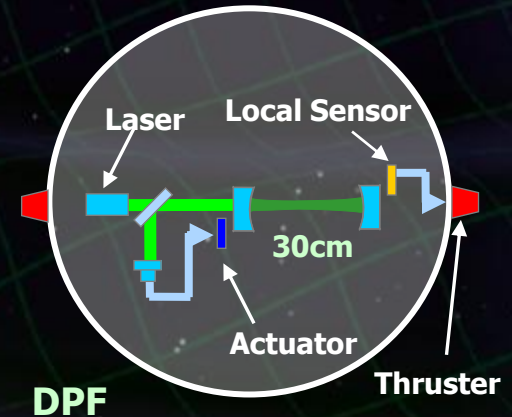


DECIGOパスファインダー (DPF)

DECIGOのための最初の前哨衛星

DECIGO : 基線長 1000kmの編隊飛行

→ DPF 1機の衛星 (基線長30cm干渉計)
350kg級 小型衛星
地球周回軌道 (高度 500km)

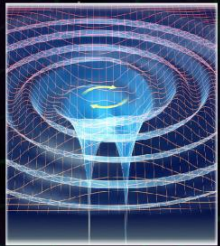


DECIGOの主要技術の宇宙実証

レーザー干渉計, 安定化レーザー光源,
ドラッグフリーシステム、データ取得と解析

宇宙・地球の観測

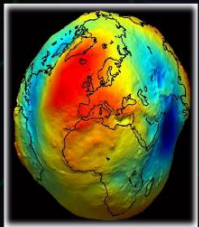
重力波観測



銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体现象を観測。

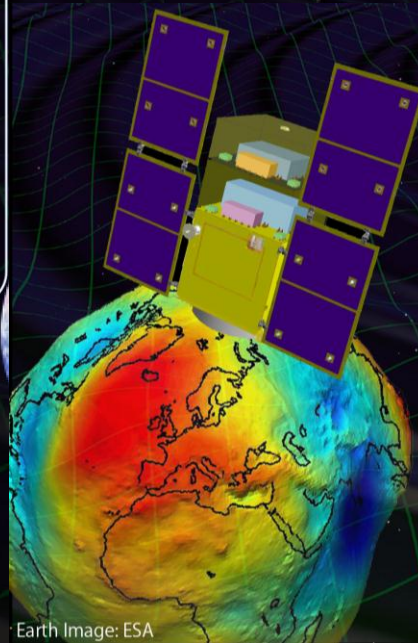
➡ 銀河形成への知見

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

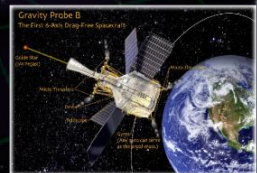
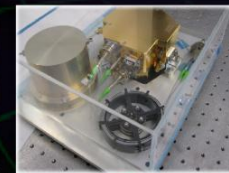
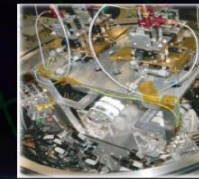


Earth Image: ESA

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

SWIMによる宇宙実証

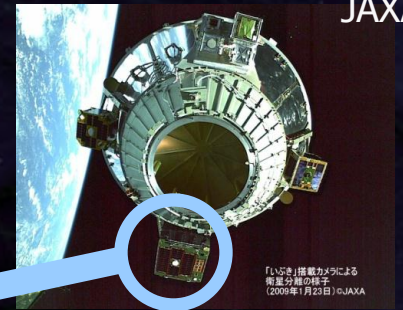
DECIGO

Photo:
JAXA

SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

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



SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000

(64bit, 33MHz)

System Memory:

2MB Flash Memory

4MB Burst SRAM

4MB Asynch. SRAM

Data Recorder:

1GB SDRAM

1GB Flash Memory

SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171

Weight: 1.9 kg

Power: 7W



Photo by JAXA

SWIM_{μv} : User Module

Processor test board

GW+Acc. sensor

FPGA board

DAC 16bit x 8 ch

ADC 16bit x 4 ch

→ 32 ch by MPX

Torsion Antenna x2

~47g test mass

Data Rate : 380kbps

Size: 124 x 224 x 174

Weight: 3.5 kg

Power: ~7W

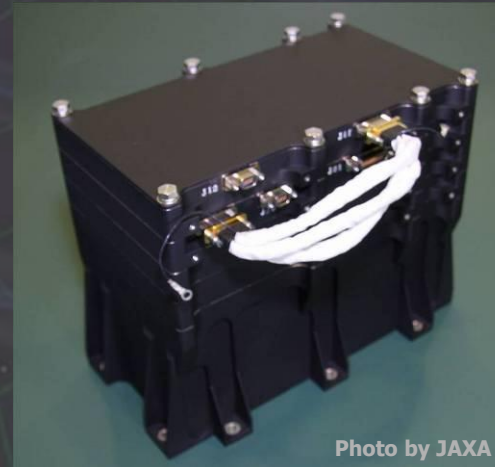


Photo by JAXA

SDS-1 Bus System

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

JAXAの小型科学衛星シリーズの候補

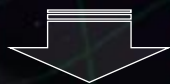
標準衛星バス + 次期固体ロケットを利用して
最低 3機の小型科学衛星 を打ち上げる計画

1号機 SPRINT-A/EXCEED (~2012年)

UV望遠鏡による惑星観測

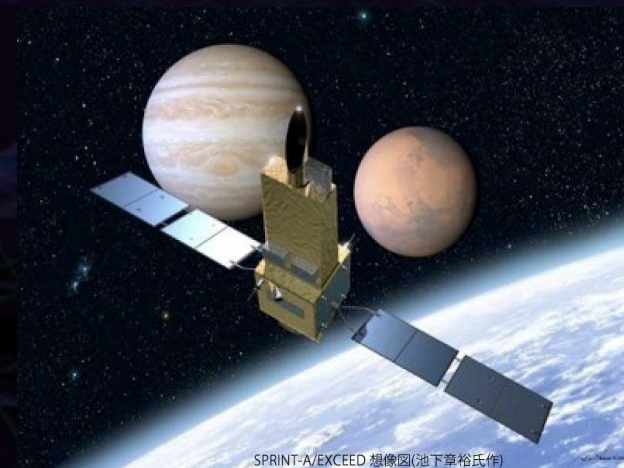
2号機 SPRINT-B/ERG (~2014/15年)

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 Follow-on, Fig. by JAXA)

TOBA (Torsion-Bar Antenna)

※Ando+ PRL (2010), Ishidoshiro+ PRL (2011)

背景と動機

重力波の周波数：

波源の運動の時間スケールを反映

→ さまざまな周波数帯での観測が望ましい。

特に低周波数帯では

大きな重力波振幅、定常的な重力波源 が期待できる。

地上望遠鏡では、低周波数帯の重力波観測は困難

- ・ 検出器の原理的な限界。
- ・ 地面振動などの環境雑音。

宇宙望遠鏡に行くのは、多大なリソースが必要。



新しい観測方式を提案する

地上でも低周波重力波を観測。

宇宙望遠鏡で独自の周波数帯を観測。

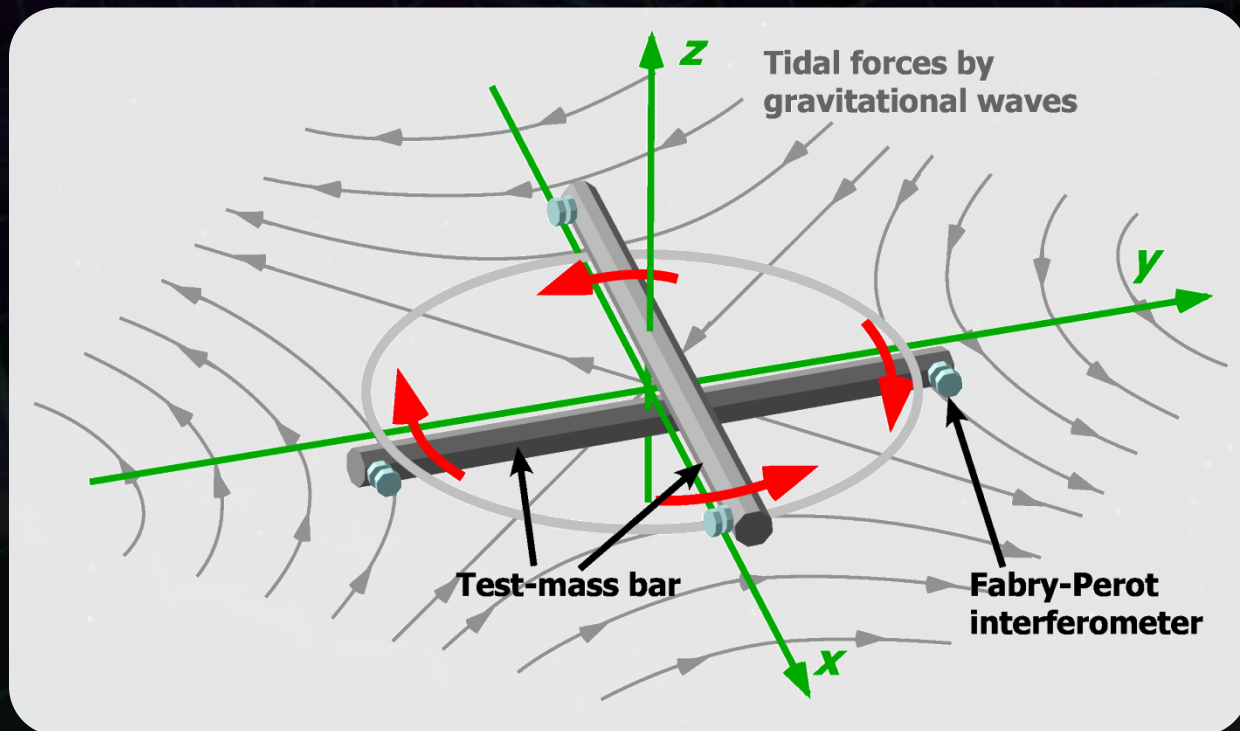
振じれ型アンテナ

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

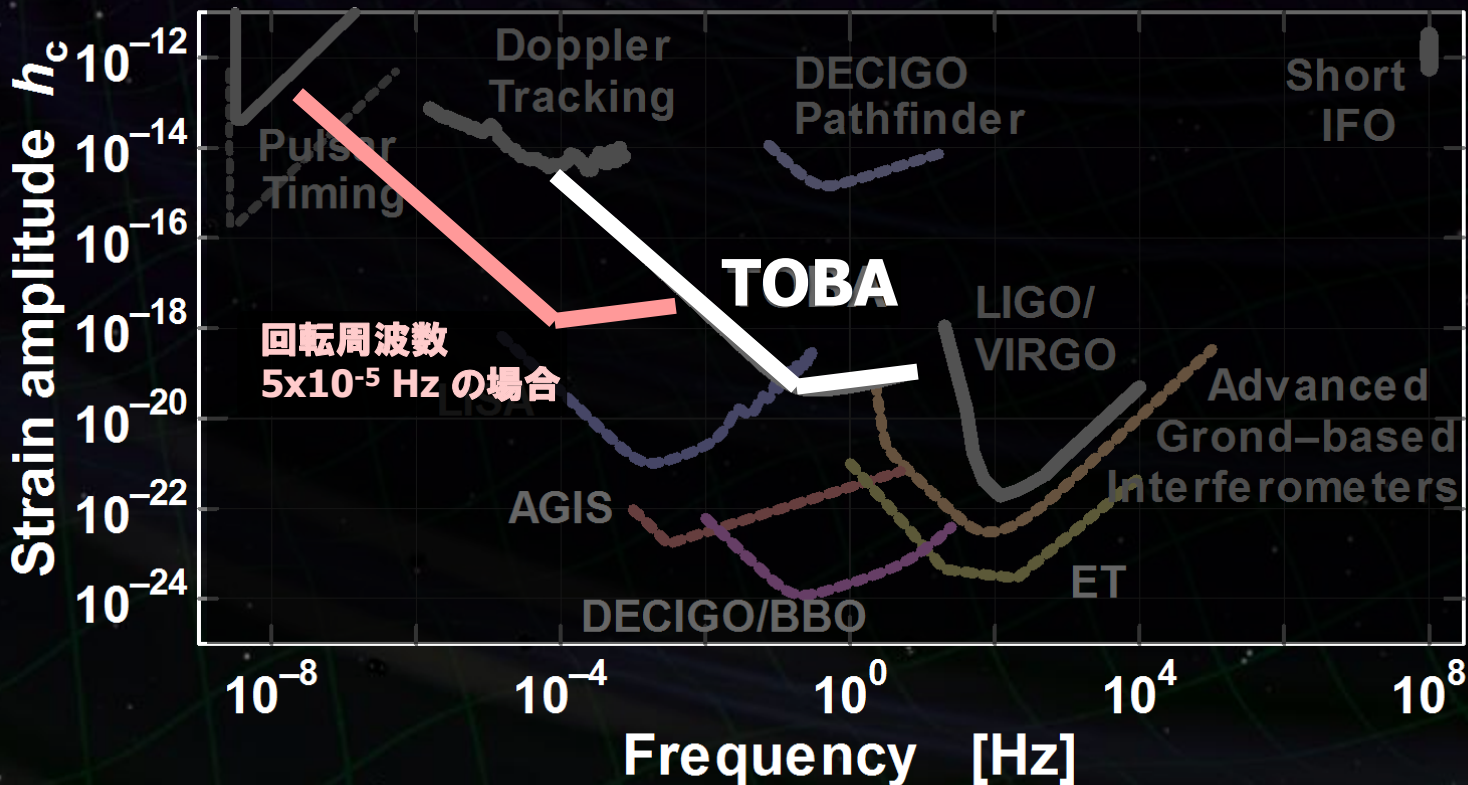
現実的なパラメータを仮定

試験質量 質量 7,600kg, 長さ 10m

レーザー光源 10W

低温動作 4K

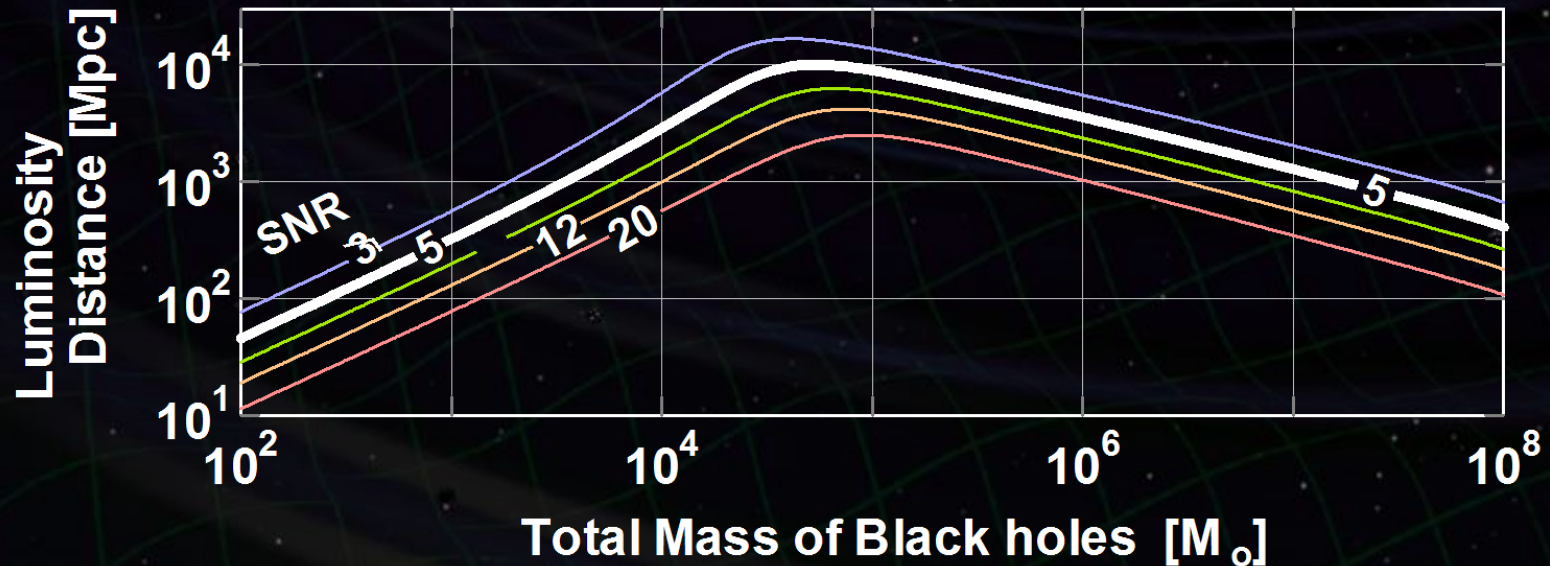
Bar length : 10m, Mass : 7600kg
Laser source : 1064nm, 10W
Cavity length : 1cm, Finesse : 100
Bar Q-value : 10^5 , Temp: 4K
Support Loss : 10^{-10}



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)

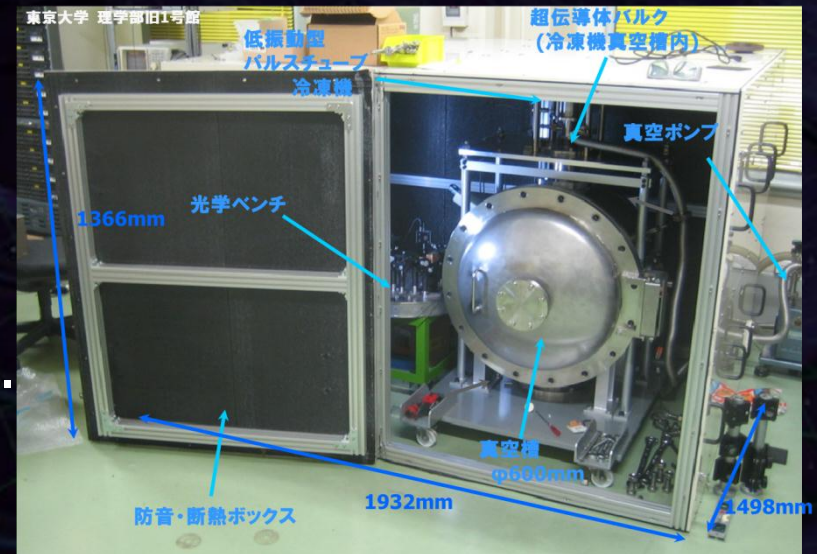


Calculation by K.Yagi

プロトタイプTOBA

• TOBAの小型プロトタイプを開発

- 東京大学・理学系研究科 に設置
- 長さ~20cm, 質量 ~160g
- 常温、真空中、超電導磁気浮上
→ 低周波数帯(0.2Hz)で世界最高感度.



• 背景重力波の探査観測

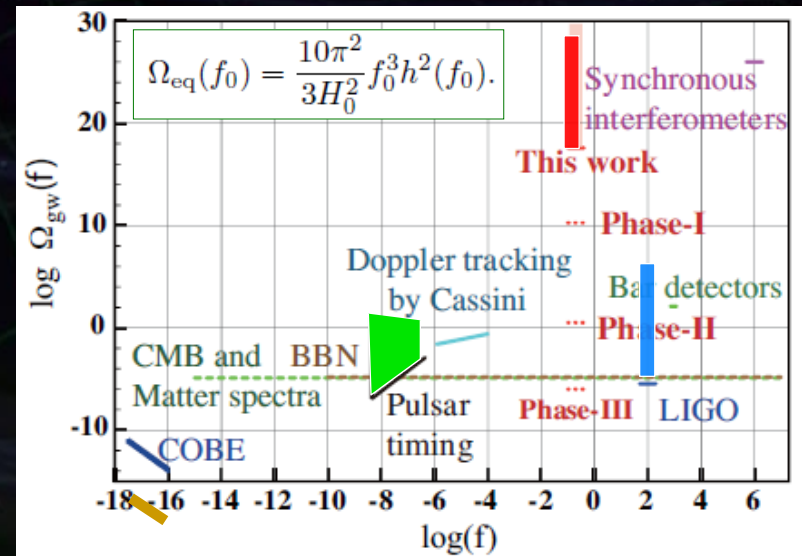
- 1台の装置での 1晩 (7.5時間)の観測
→ 安定な時間3.5時間のデータを使用
- 背景重力波の探査

等方・無偏波, 定常・ガウシアン

- 観測結果

0.2Hz背景重力波に上限値

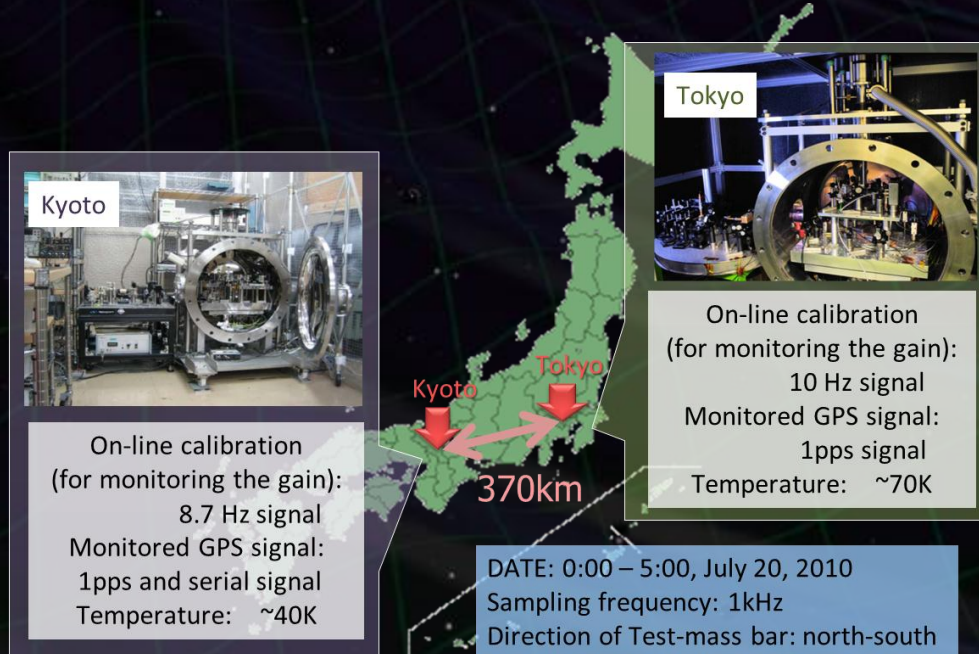
Ishidoshiro, Ando+, PRL (2011)



TOBA 次のステップ

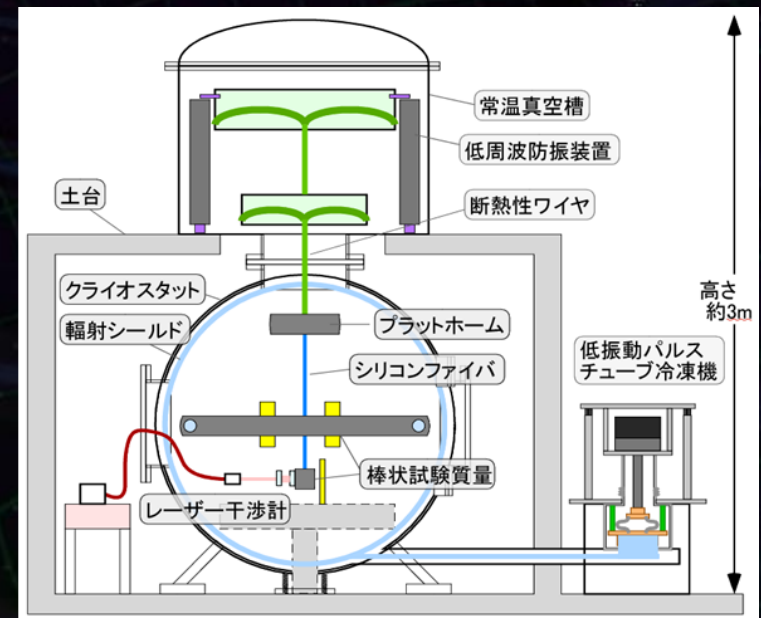
• TOBAによる同時観測

- 2台目を京都大学・理学研究科に開発.
- 東京大学の装置を同時運転 (2010-)
→ 背景重力波の観測, データ解析.



• 中型TOBA計画

- 長さ1mスケールのTOBA
- 低温・防振による高感度化.



回転TOBAプロトタイプ : SWIM μ v

超小型宇宙重力波検出器

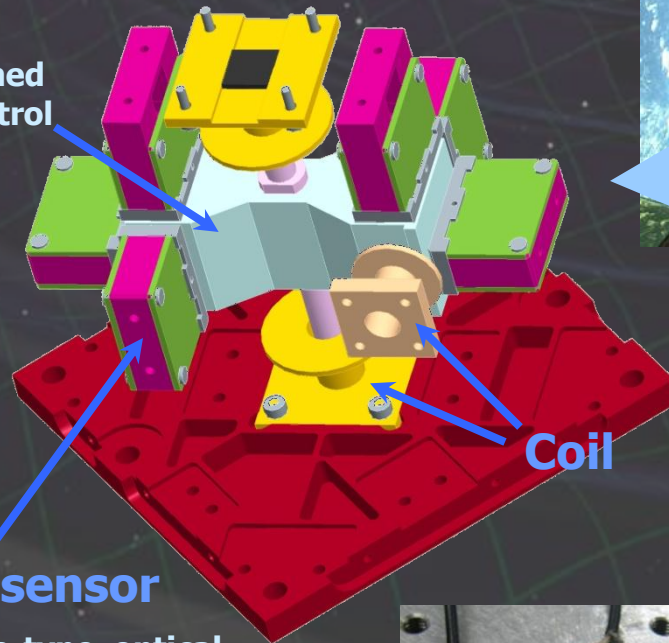
2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 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



Coil

Photo sensor

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

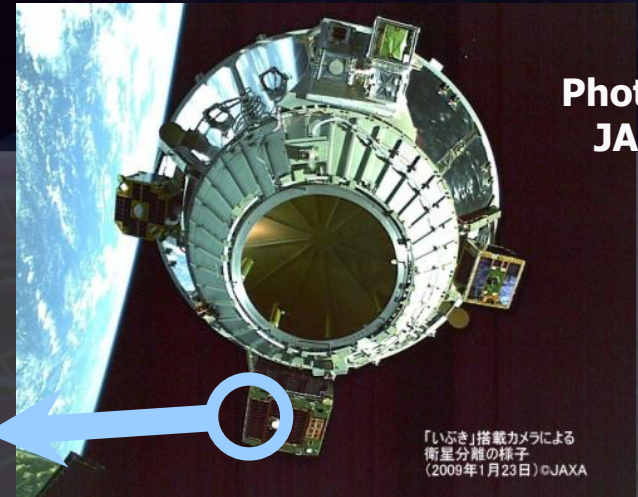
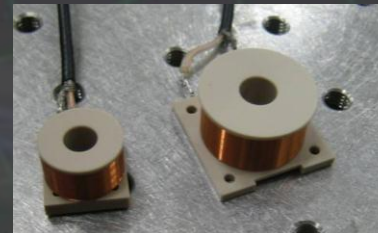
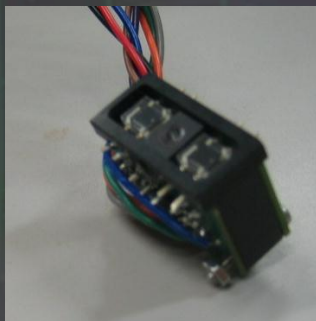
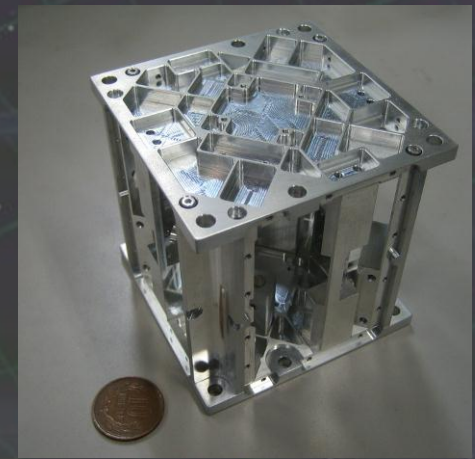


Photo:
JAXA

「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA



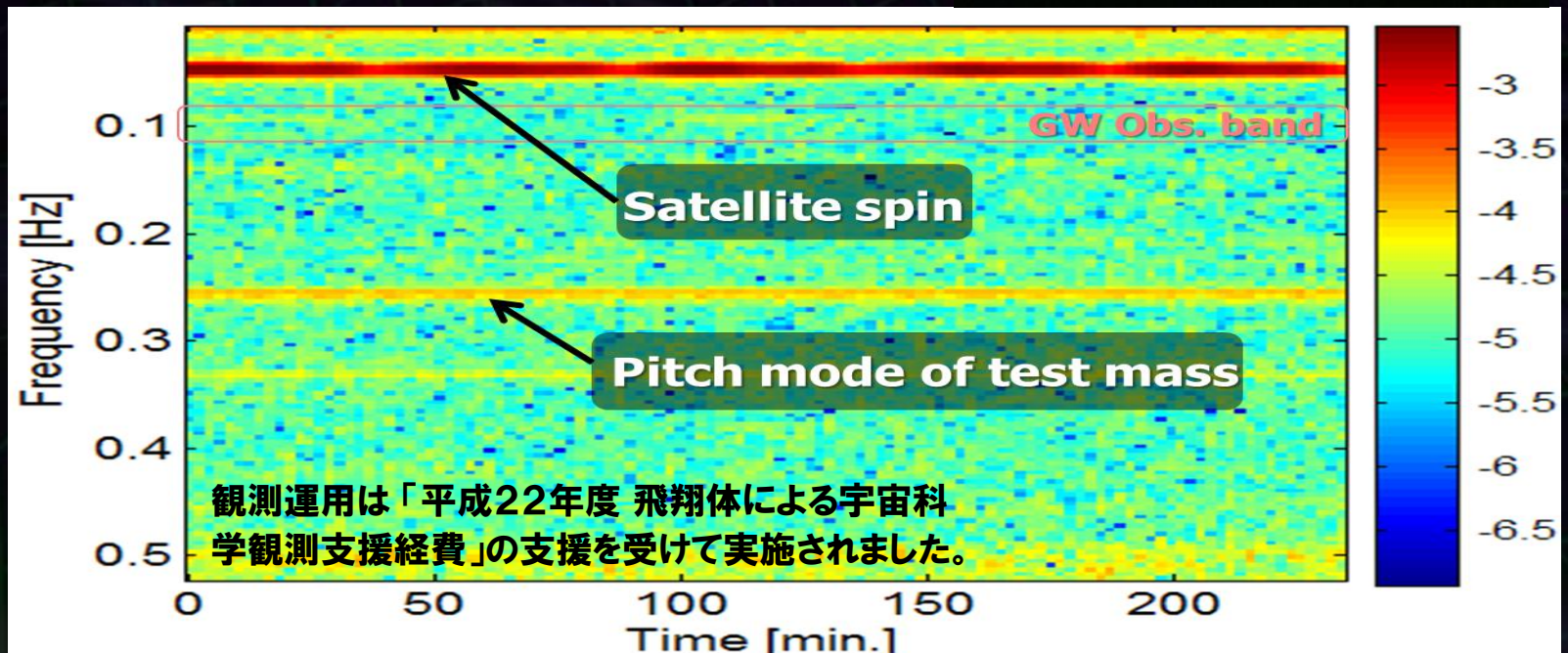
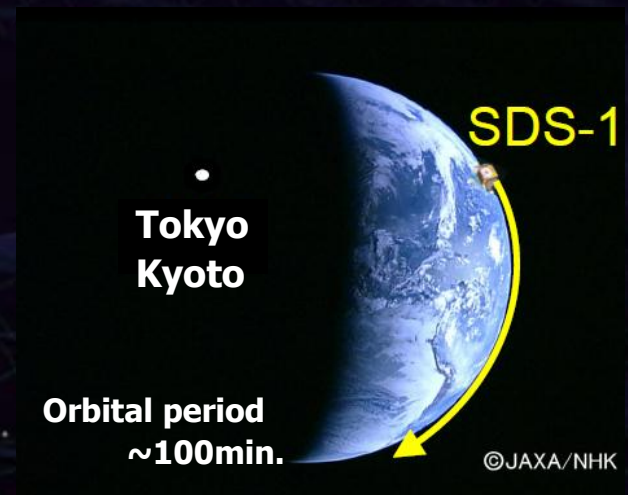
SWIM による観測運転

長時間データ取得

Jun 17, 2010 ~120 min.

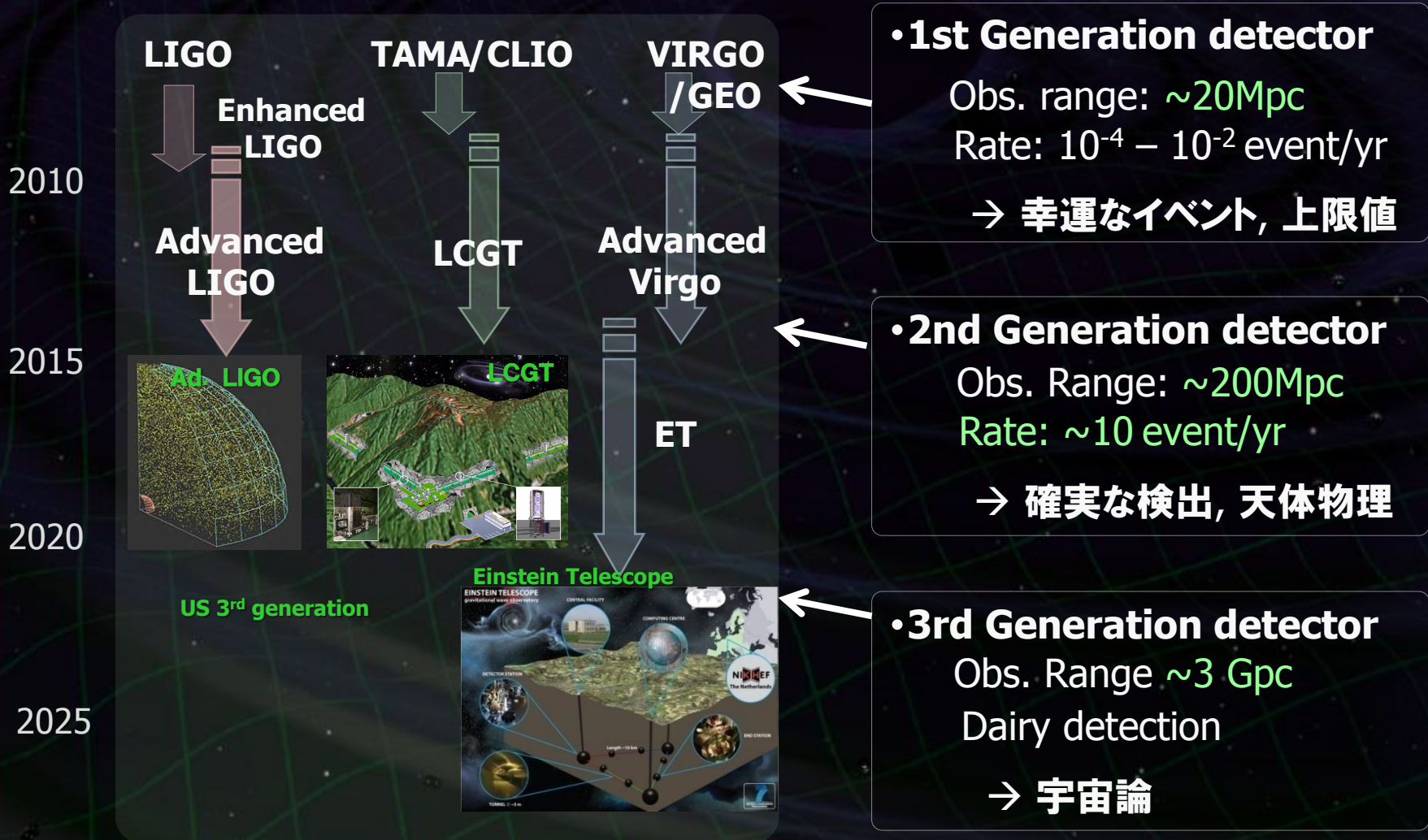
July 15, 2010 ~240 min.

地上重力波検出器との同時観測運転
銀河中心方向に感度を持つよう姿勢決定

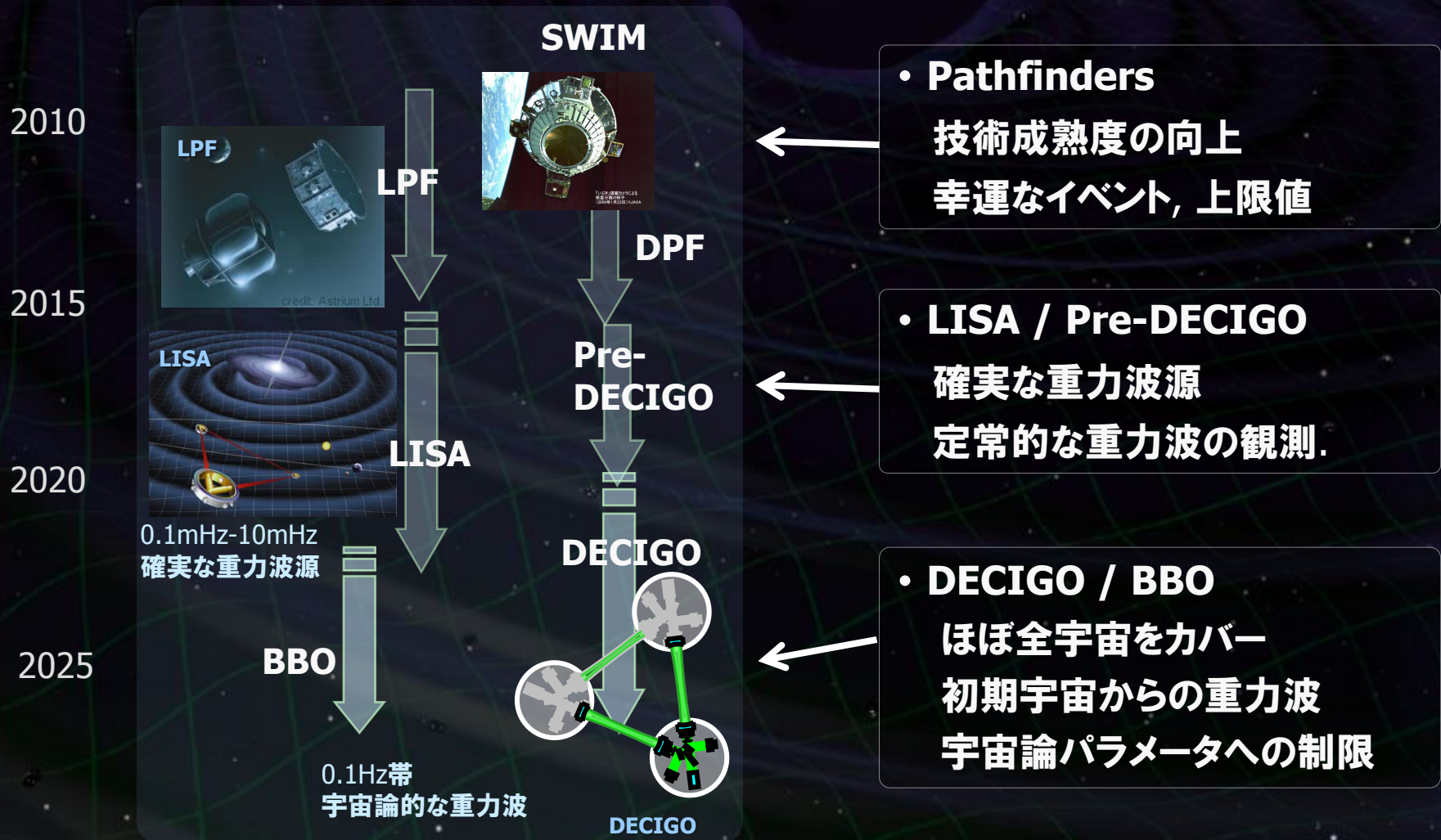


まとめ

地上重力波望遠鏡のロードマップ



宇宙重力波望遠鏡のロードマップ



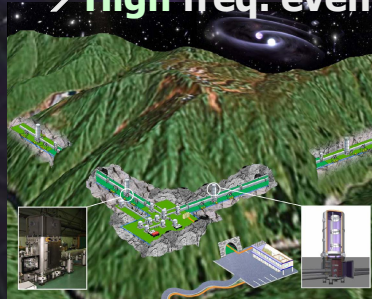
国内のアクティビティ (+TOBA)

TOBA (2009~)
2nd TOBA at Kyoto

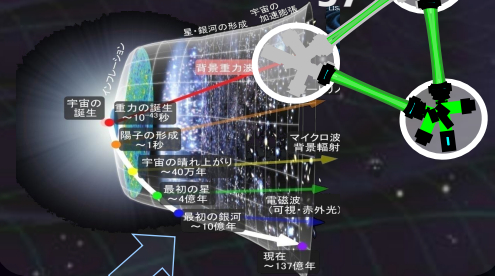


低温・防振技術

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



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

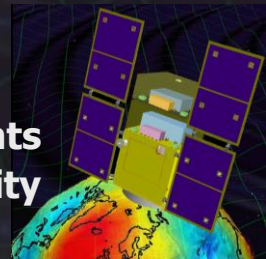


TOBA (2005~)
Novel Detector configuration



低周波数雑音

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

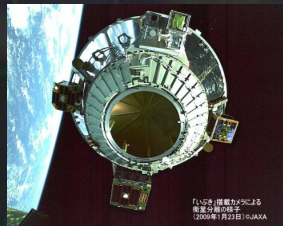


Pre-DECIGO (2021~)

Satellite Gravity (?~)
Space observatory
→ Earth environment



SWIM (2009~)
First module in orbit



回転TOBA

まとめ

LCGT : プロジェクトが始まった

- 観測可能距離 200Mpc以上 → 年間数回以上の重力波検出.
- 海外の望遠鏡とともに 第2世代の観測ネットワークを形成

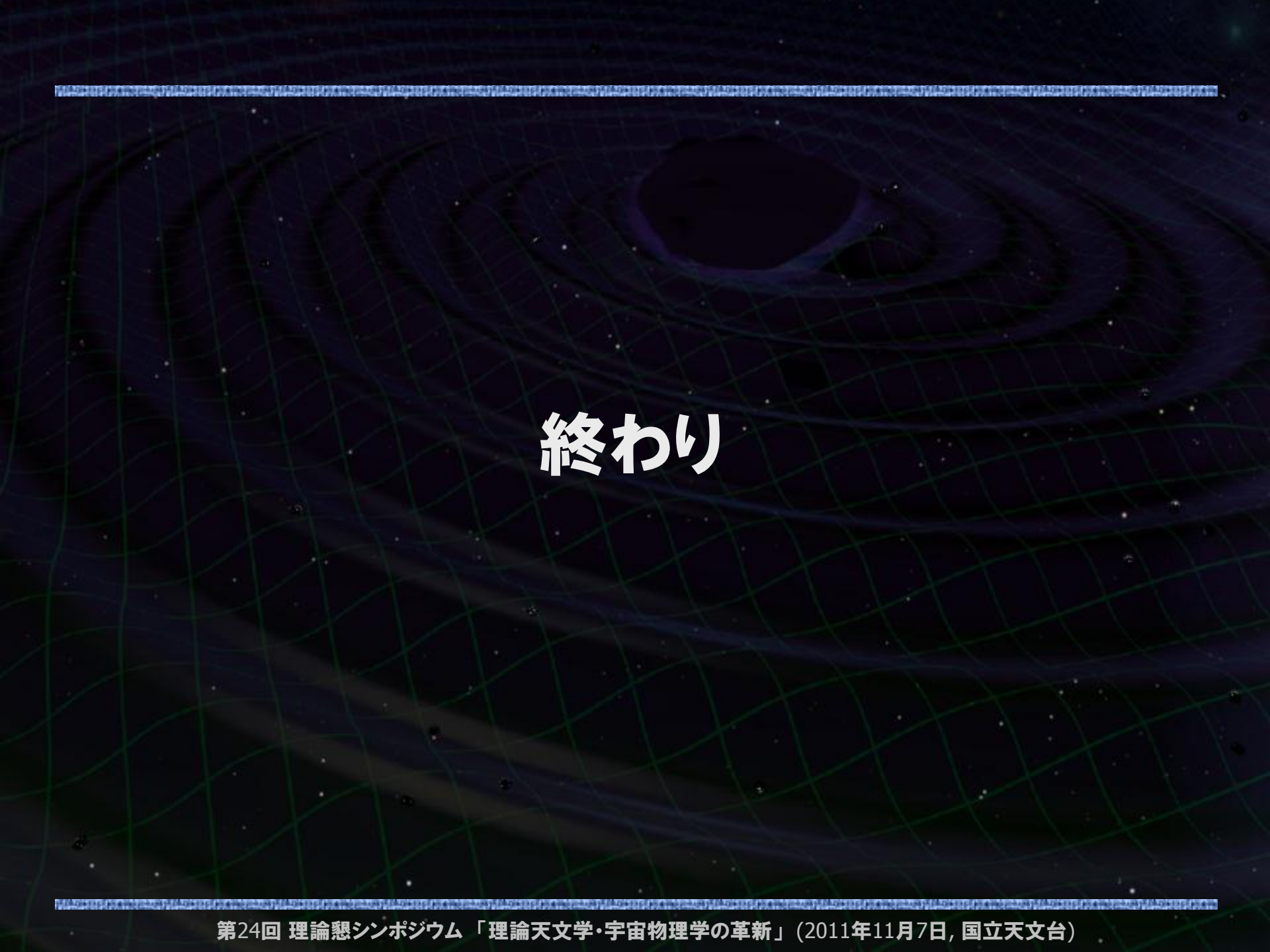
⇒ 重力波天文学の分野を切り開く.

- LCGTでは, 世界に先駆けて第3世代の技術も実証.
低温干渉計技術, 地下サイト

DECIGO/DPF

- DECIGO 検討と DPF のための搭載機器開発.
- SWIM による宇宙実証試験・観測運転.

TOBA による新しい研究の方向性.



終わり