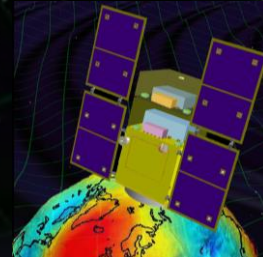
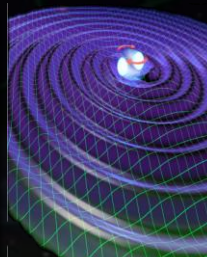
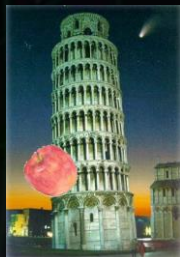


機構長プレス懇談会「インフレーションと重力波」

重力波でさぐる宇宙

- レーザー干渉計型望遠鏡と重力波天文学の将来 -

安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台)

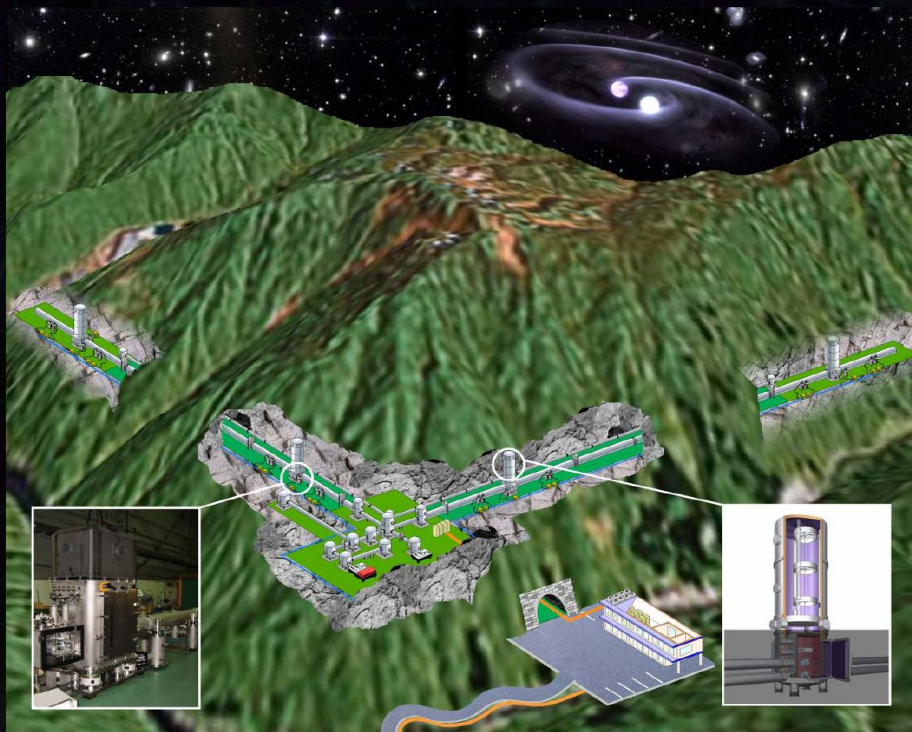


KAGRA (~2017)

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

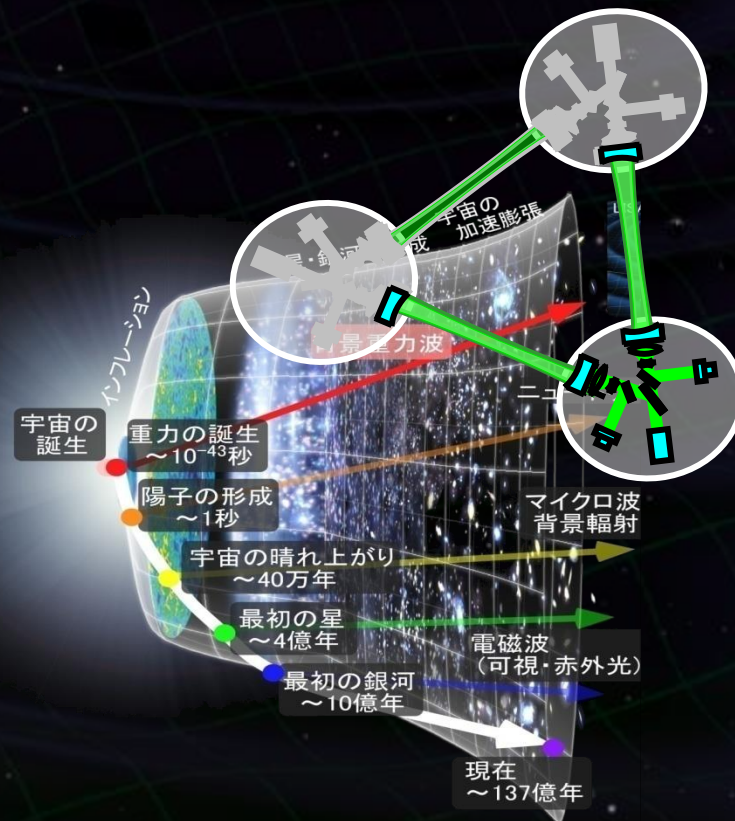


DECIGO (~2027)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開



BICEP2, (QUIET, PolarBeaR,...)

マイクロ波望遠鏡を用いた
宇宙背景放射 B-mode偏光
成分の観測.

DECIGO, (KAGRA, aLIGO,...)

重力波望遠鏡を用いた
宇宙背景重力波の観測.

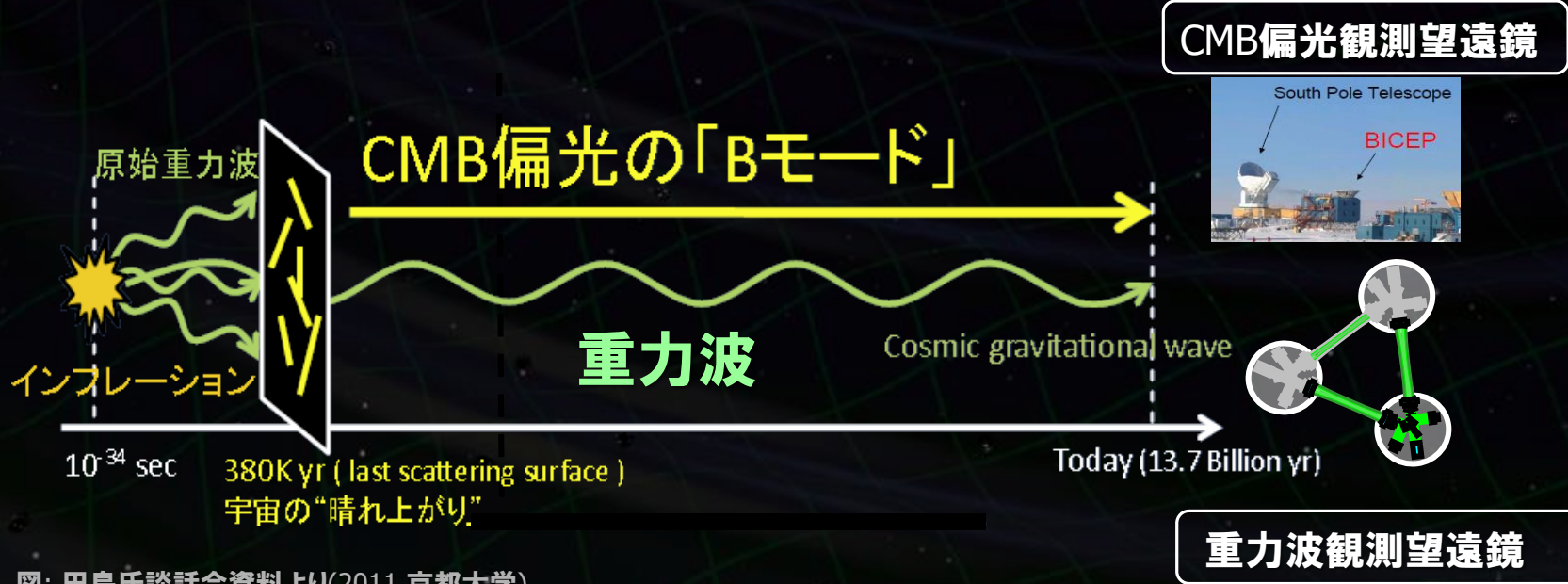
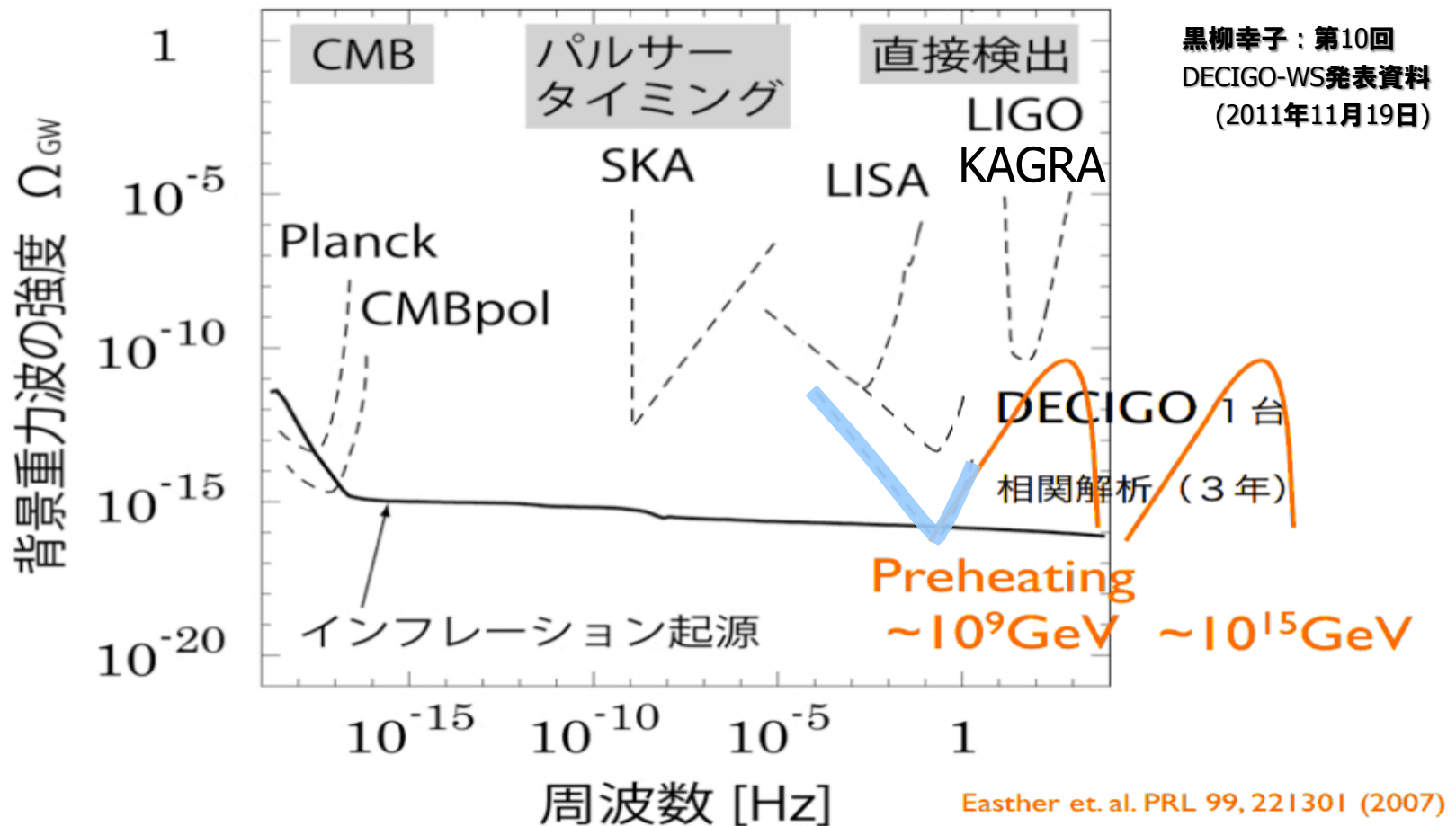


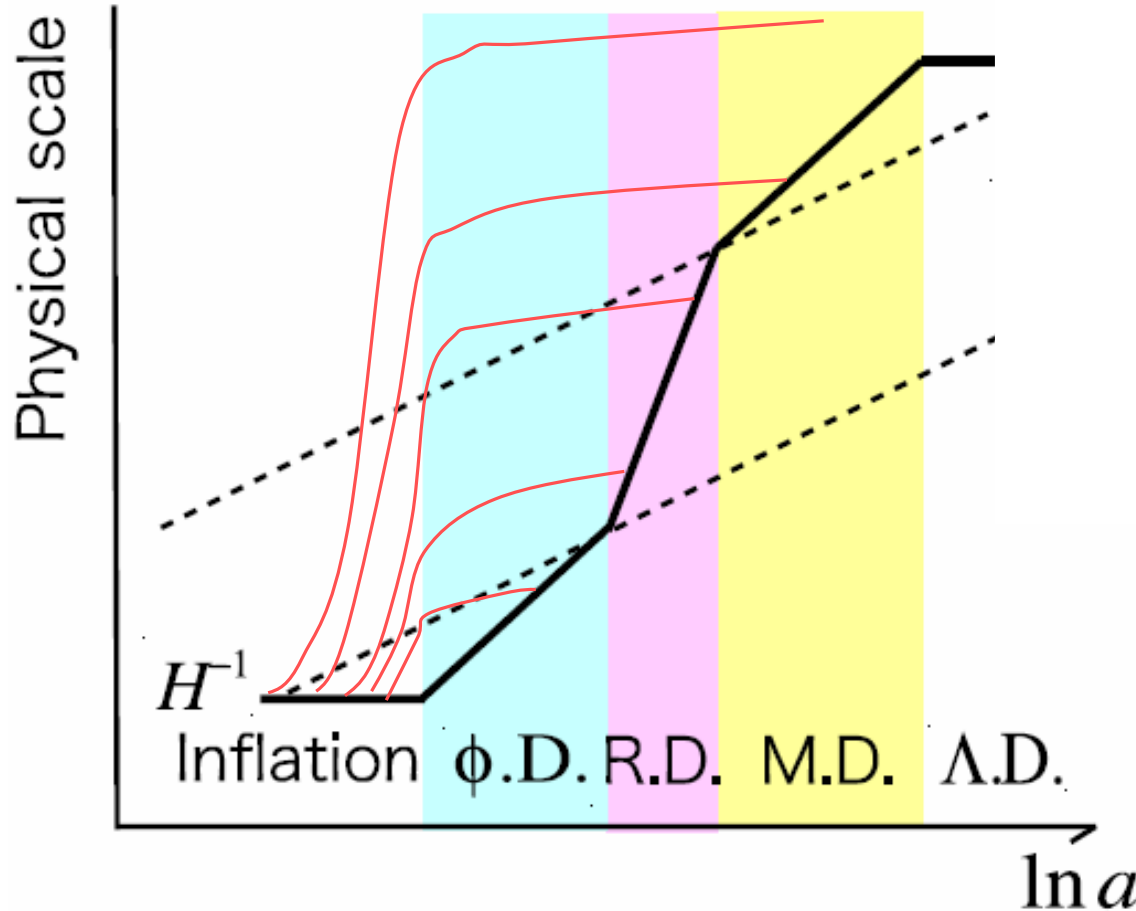
図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)

初期宇宙からの重力波

初期の方が宇宙のサイズ(因果律を持つ領域)が小さい。
→ 初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波。



初期に生成された重力波ほど、より長くインフレーションで引き延ばされる → 低周波になる。

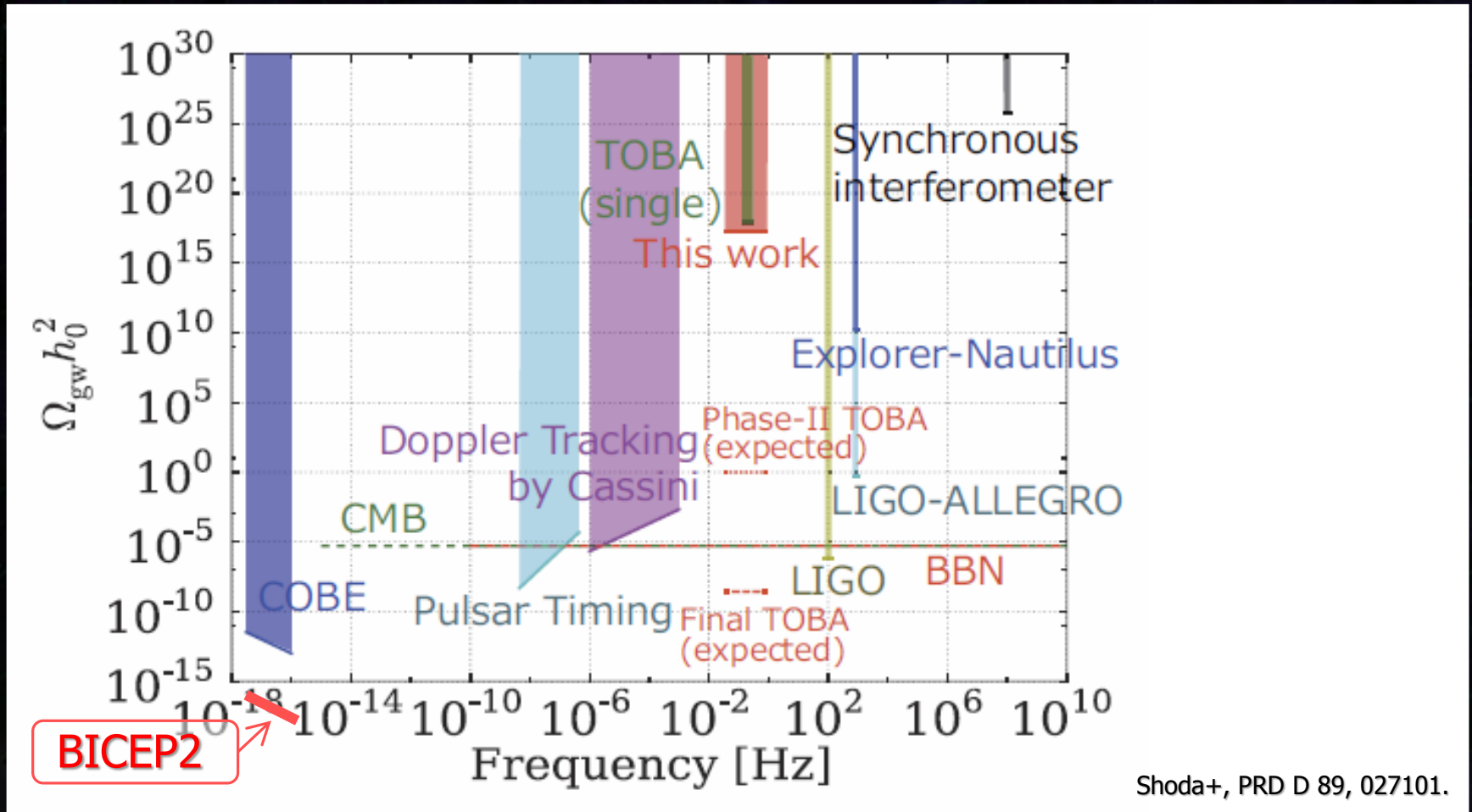


Nakayama+,
Journal of Cosmology
and Astroparticle Physics
06 (2008) 020.

重力波検出器の種類



背景重力波探査の現状



重力波による天文学!!!



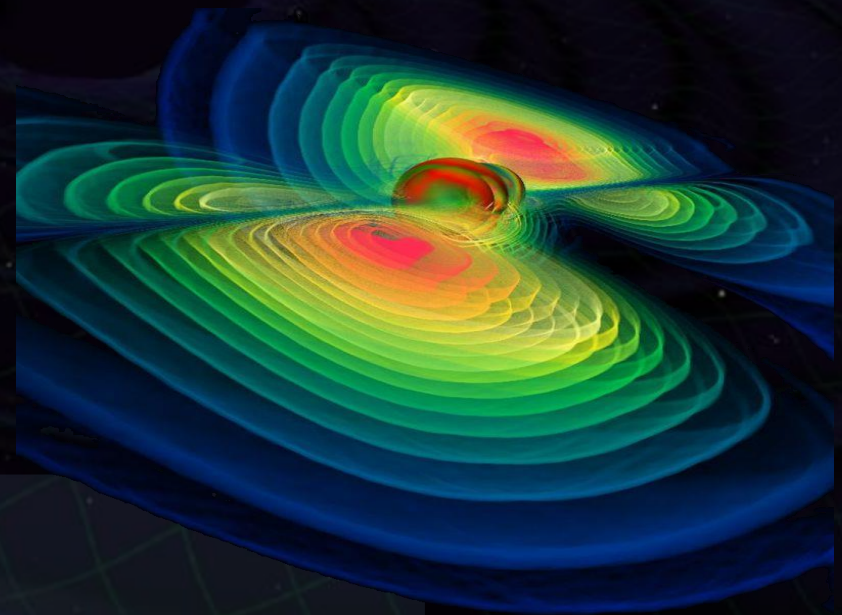
重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力



宇宙を観測する新しい手段

- ・電磁波と相補的・独立な観測
- ・電磁波などでは見ることの出来ない現象
(初期宇宙, 高エネルギー天体現象の内部)

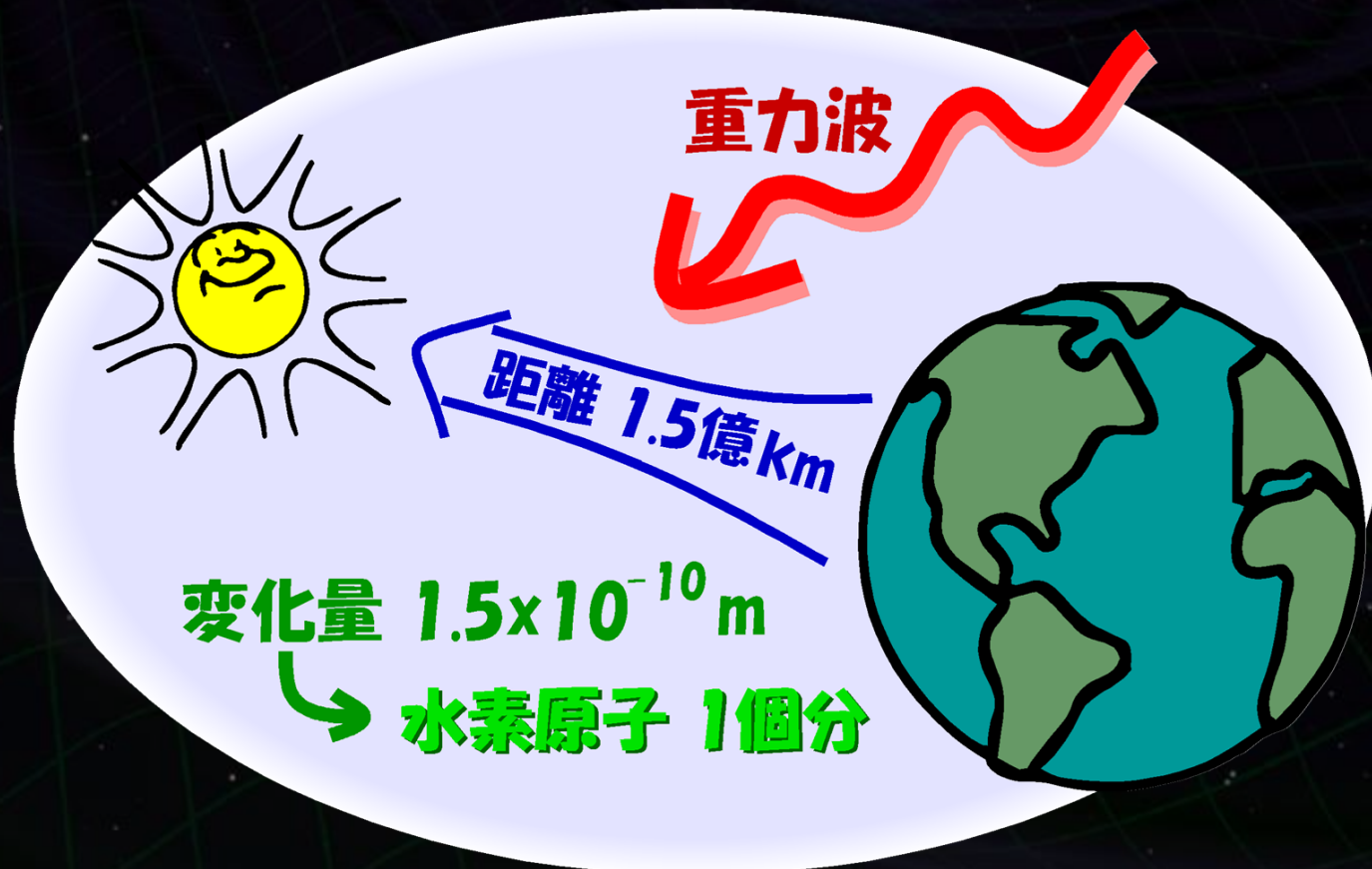


重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

重力波の効果：2点間の固有距離の変化



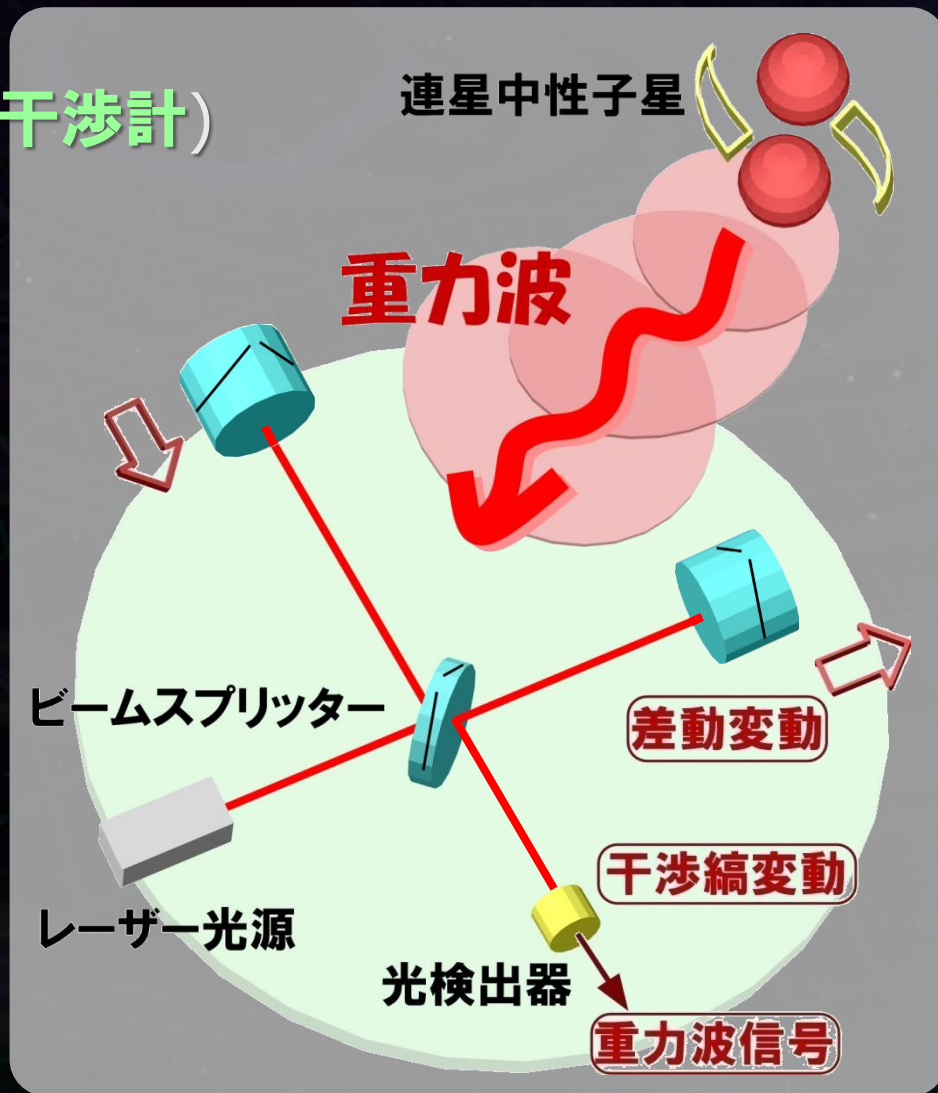
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐.
- 懸架された鏡で打ち返し干涉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干涉光量の変動として検出



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

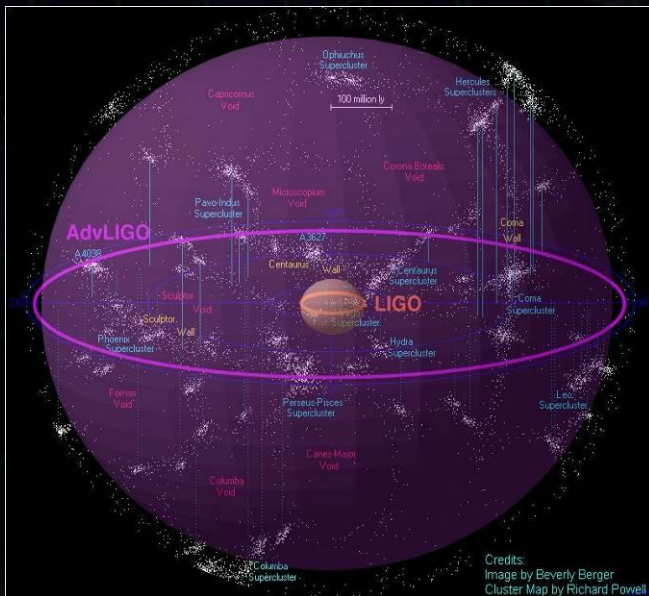
→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

第一世代の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

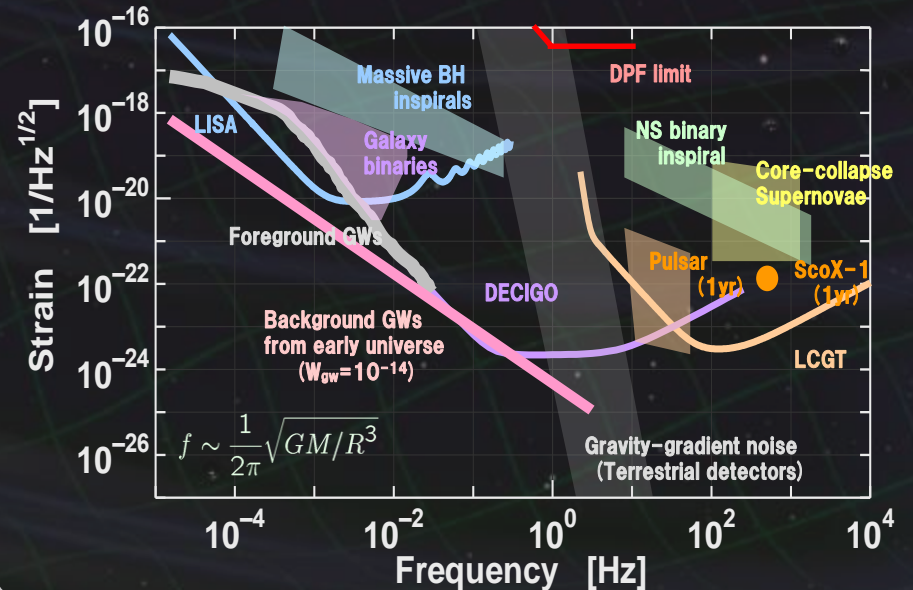
ただ... そのような重力波イベントは稀 (10^{-5} - 10^{-3} event/yr)

⇒ 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



KAGRA (かぐら)

- 大型低温重力波望遠鏡 -



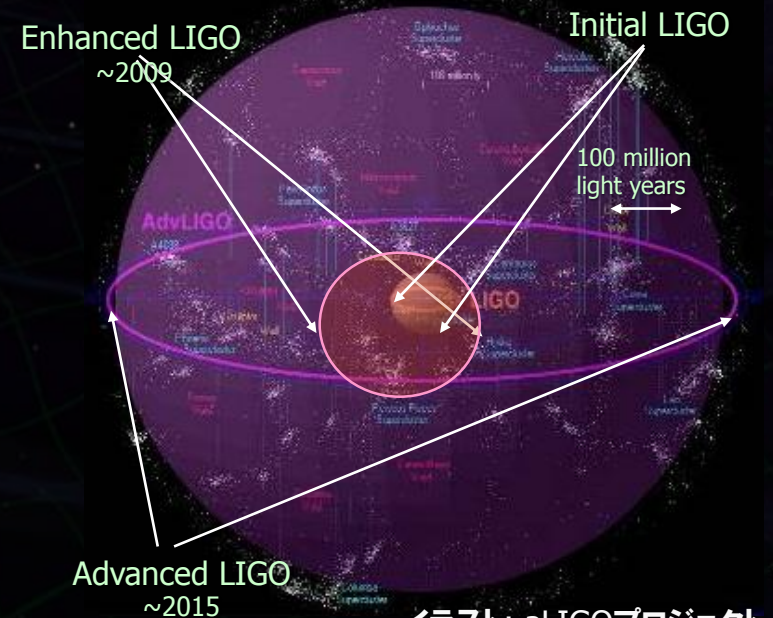
約1桁感度を向上した 第2世代の地上重力波望遠鏡

高感度化→より多くの銀河をカバー



感度が10倍向上

→ イベントレートは 10^3 倍



第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

かぐら (KAGRA)

日本の大型重力波検出器 (本格観測 2017年-)
一年間に10回程度のイベント観測が期待できる。



重力波天文学



•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

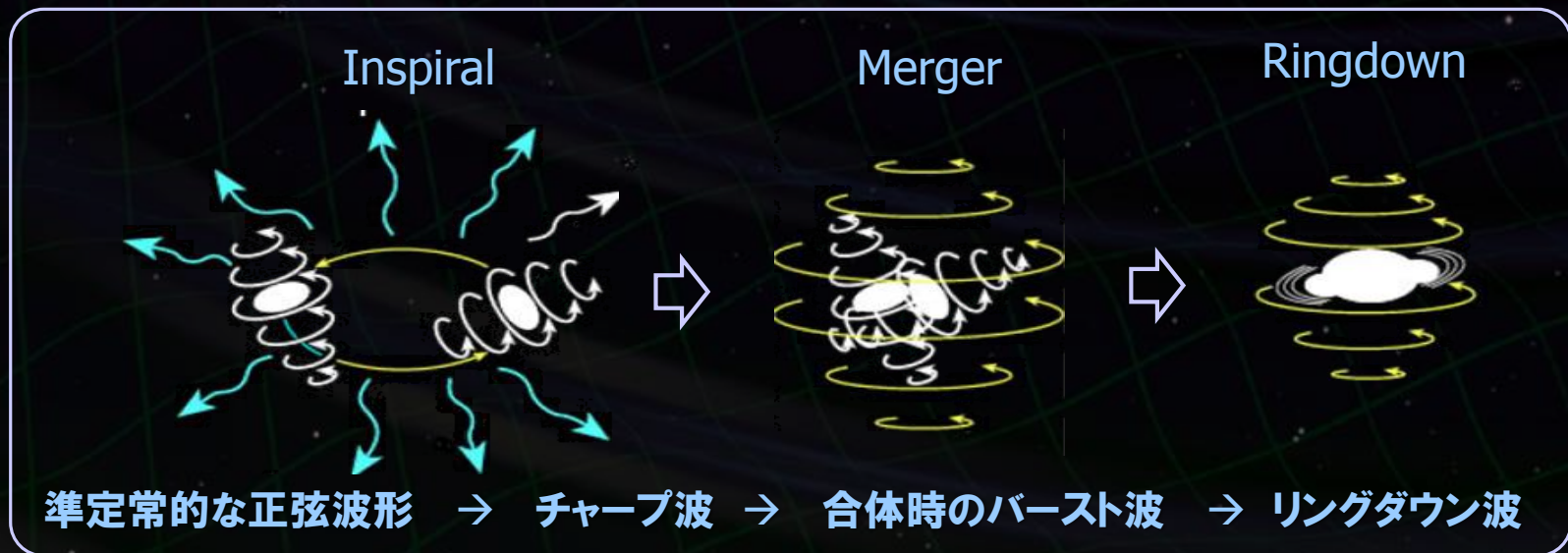
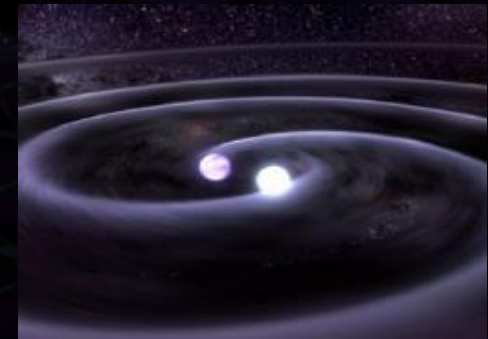
高エネルギー加速器研究機構

•国内外の研究機関

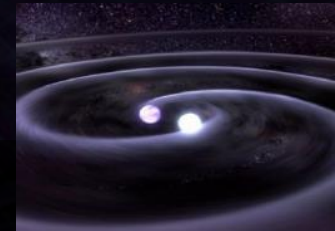
東京大, 大阪市大, 東工大,
大阪大, 京都大, 産業技術総
合研究所, 情報通信研究機構,
電気通信大, 山梨英和大 など。

・連星中性子星の合体：現在もっとも有力な重力波源.

- 電波パルサー観測により、存在が確認.
- 頻度の見積もりが可能.
- 地上重力波望遠鏡の観測周波数帯の信号.
- 波形予測が可能.
- 波形の情報から、さまざまな科学的知見.



連星中性子星合体からの重力波観測



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 270 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)



KAGRAの観測レート 9.8 events/yr

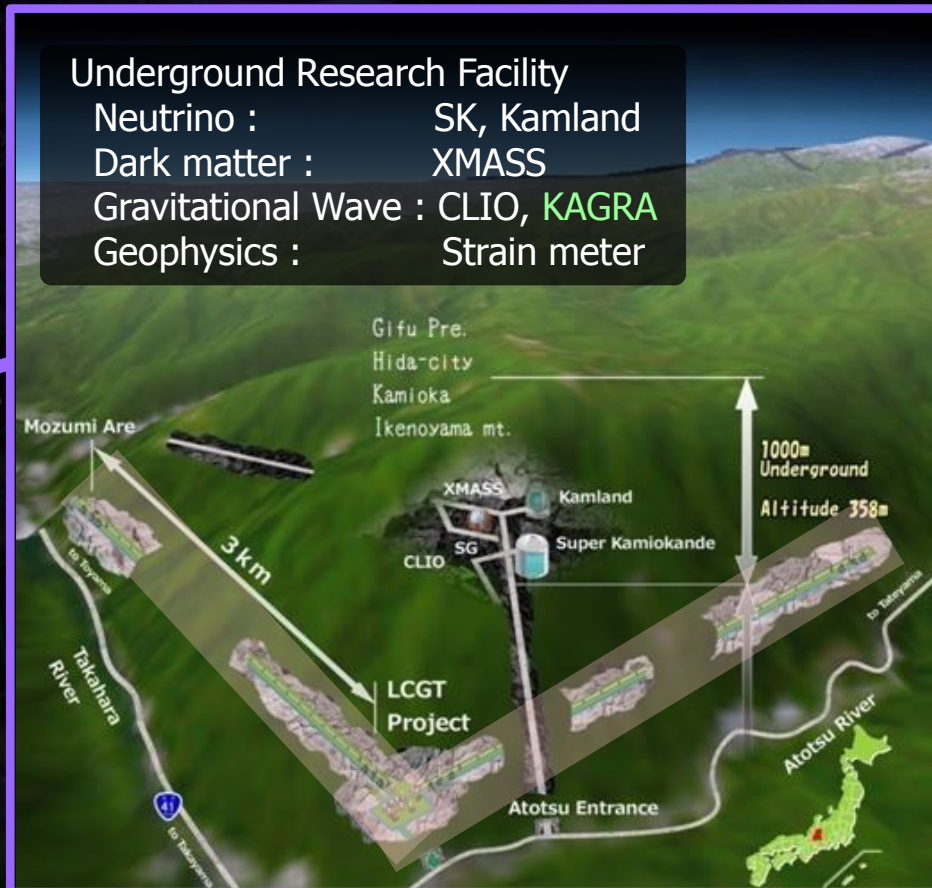
(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

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.



Map by Google



Underground Research Facility
Neutrino : SK, Kamland
Dark matter : XMASS
Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**
Geophysics : Strain meter

掘削工事の完了

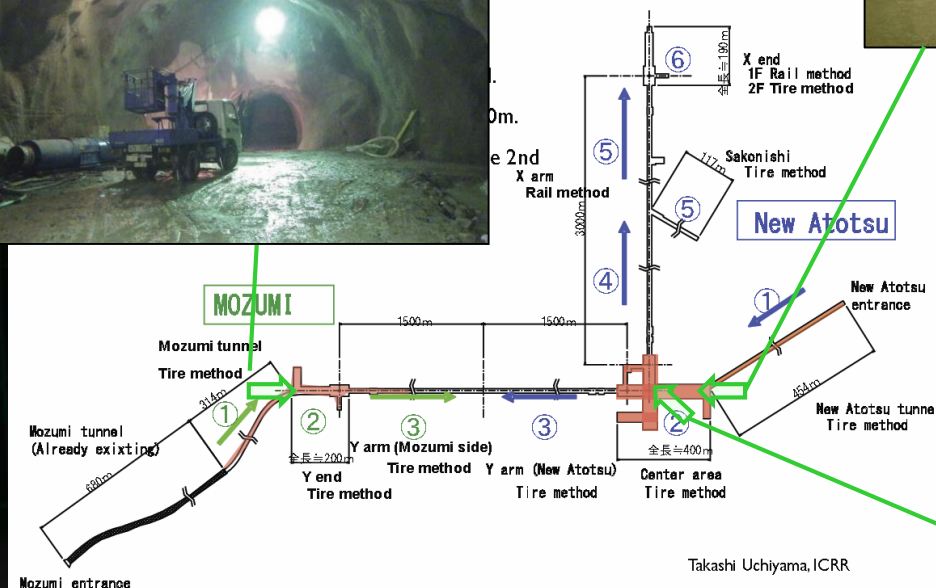
茂住口：
Y腕トンネル



新跡津口：センタールーム



Report for the KAGRA
2012/12/17. JGW-G12

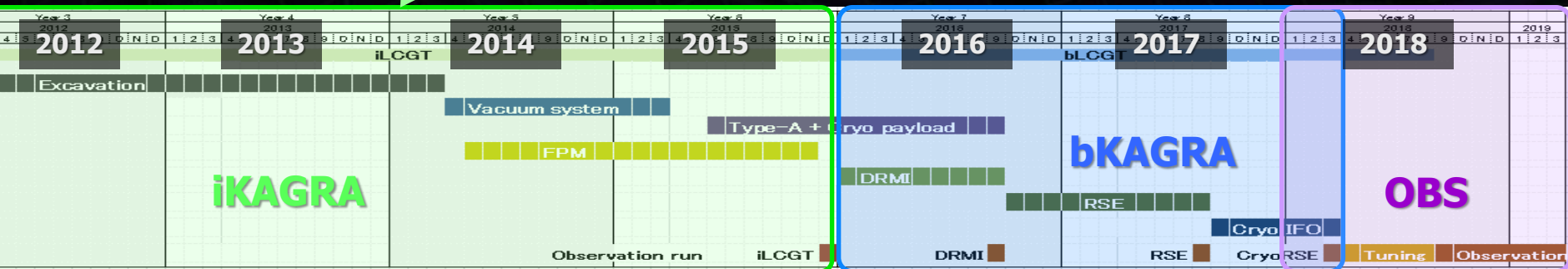


KAGRAスケジュール

• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

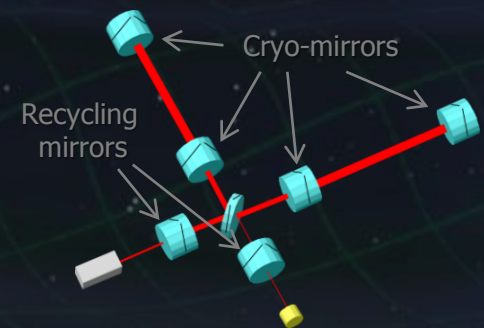
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

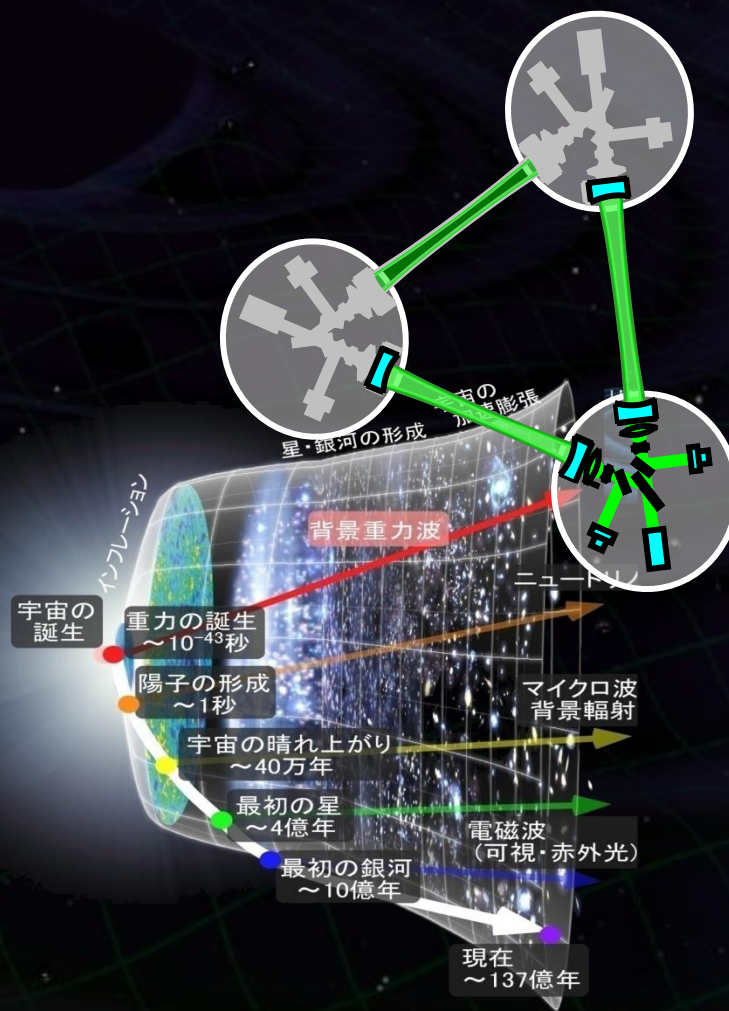
Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



DECIGO (でせいご)

- 宇宙重力波望遠鏡 -



宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

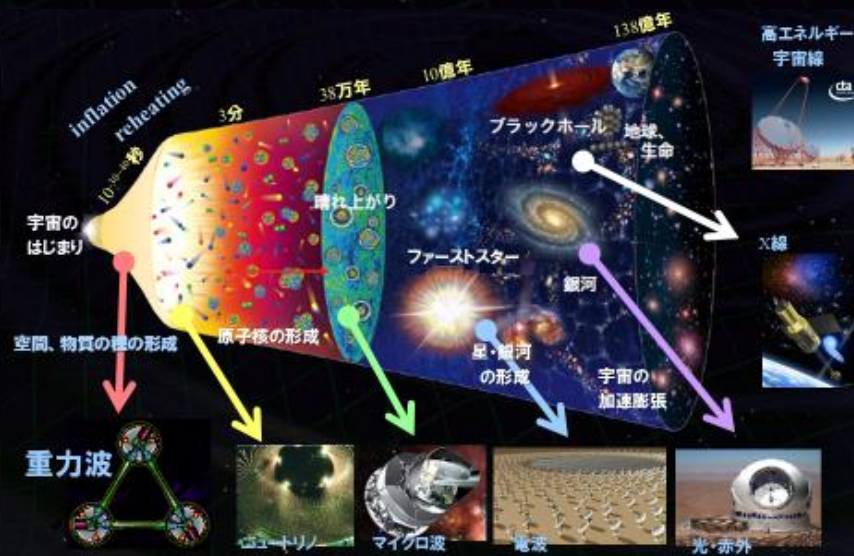
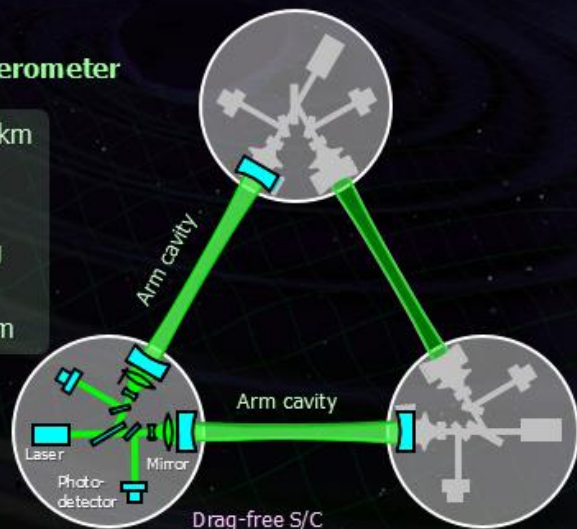
宇宙のはじまりを直接観測する。

**ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。**

Interferometer Unit:
Differential FP interferometer

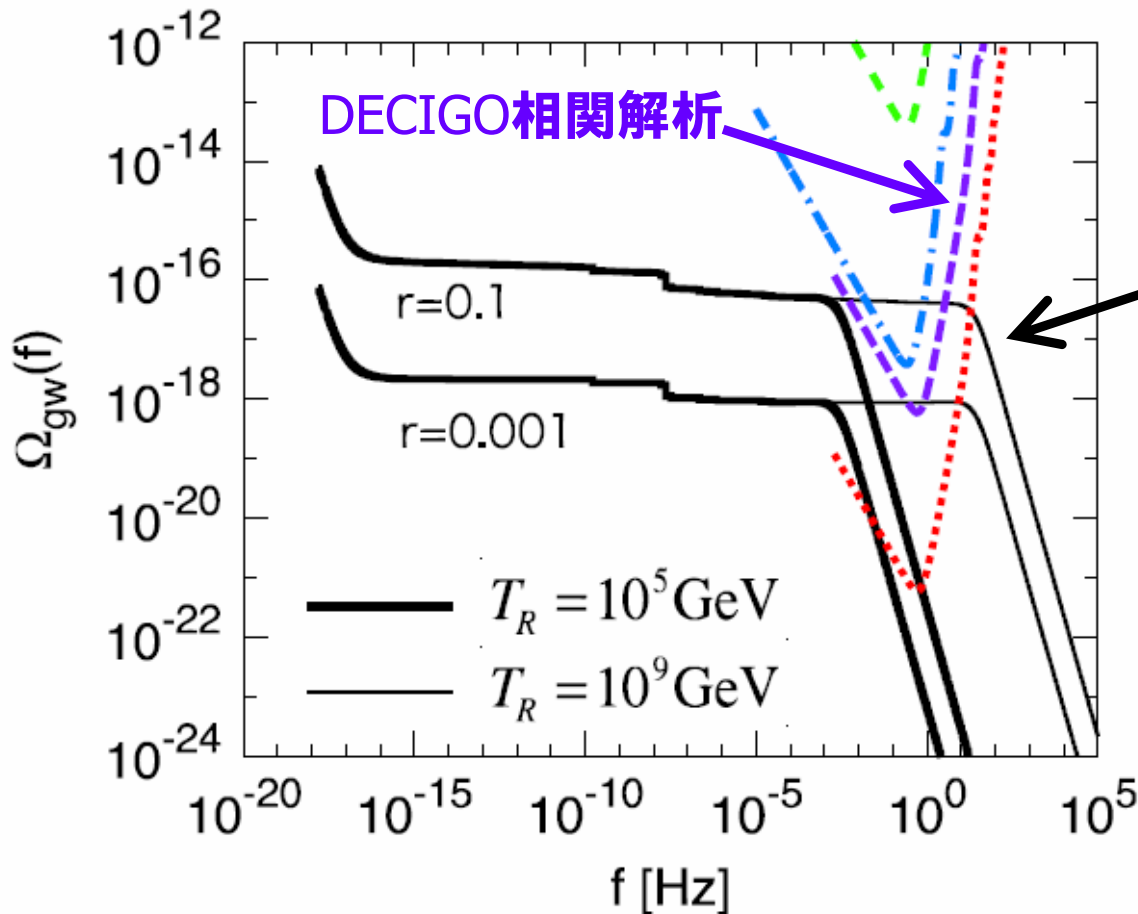
Arm length: 1000 km
Finesse: 10
Mirror diameter: 1 m
Mirror mass: 100 kg
Laser power: 10 W
Laser wavelength: 532 nm

S/C: drag free
3 interferometers



背景画: 福井康雄監修「宇宙史を物理学で読み解く
-素粒子から物質・生命まで」(名古屋大学出版会)より

背景重力波のエネルギー密度 : テンソルスカラー比(r)に比例.
重力波のスペクトル : 宇宙の進化の歴史を反映.



- スペクトルの大きさ.
→ インフレーションのエネルギースケール.
- 折れ曲がりの周波数
→ 再加熱のエネルギースケール
'いつビッグバンが起きたか'.

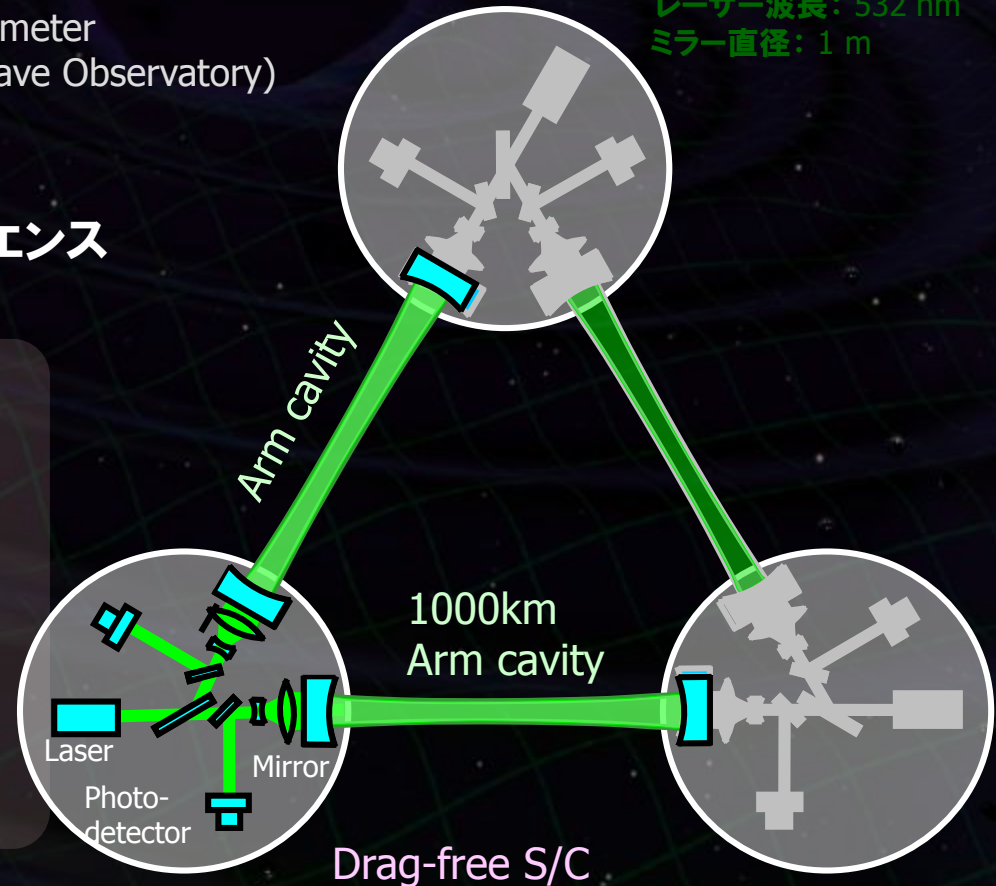
Nakayama+,
Journal of Cosmology
and Astroparticle Physics
06 (2008) 020.

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 (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



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

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



SWIMによる宇宙実証

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



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

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

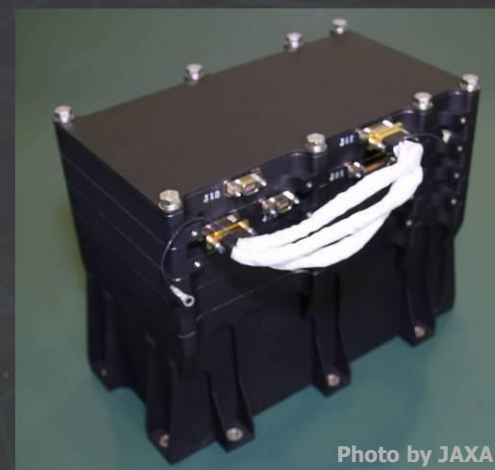


Photo by JAXA

SDS-1
Bus System

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

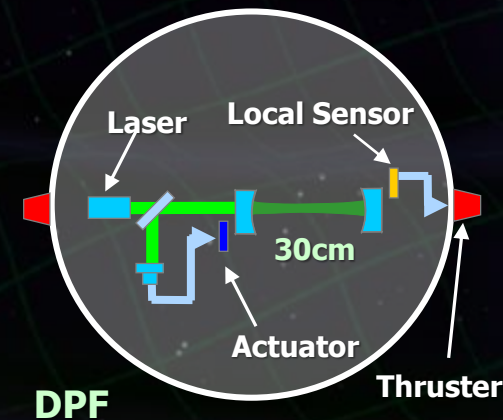
DECIGOパスファインダー (DPF)

- DECIGOの最初の前哨衛星
- DECIGOで必要とされる主要技術のうち、1機の衛星で可能な要素の宇宙実証。



400kg級 衛星一機 500km 地球周回軌道

- 基線長30cm干渉計による干渉計技術実証.
- 安定化レーザー光源の動作.
- ドラッグフリーの実現.
- 総合的・連続的な観測運用.



DECIGOパスファインダー (DPF)

将来の宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための前哨衛星

1機の衛星で可能な宇宙実証をおこなう

→ DECIGOのみならず、宇宙・無重力環境
利用のための先端宇宙技術の確立。



イプシロン搭載小型ミッション としての実現を目指す。

小型衛星 1機 (重量 400kg)

地球周回軌道 (高度 500km)

打ち上げ目標 2019年。

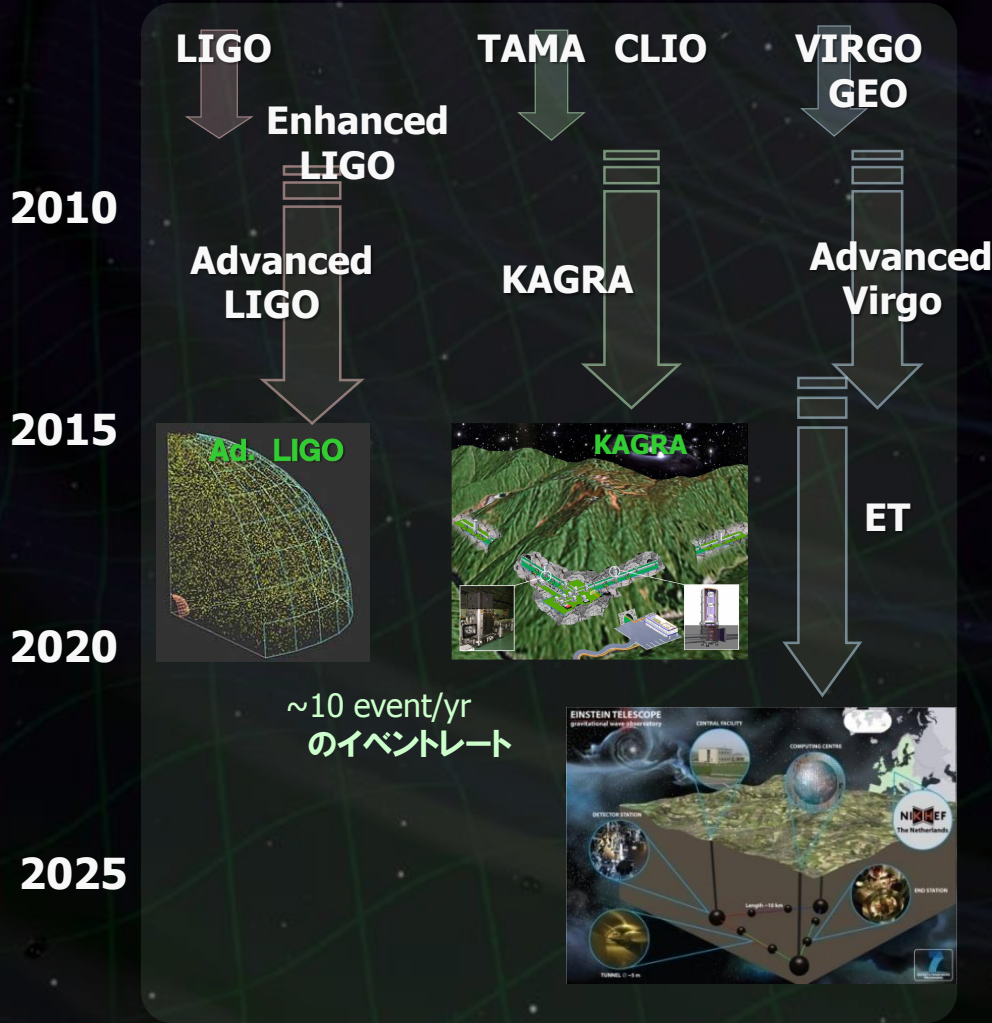
Earth Image: ESA

最後に

重力波天文学のロードマップ

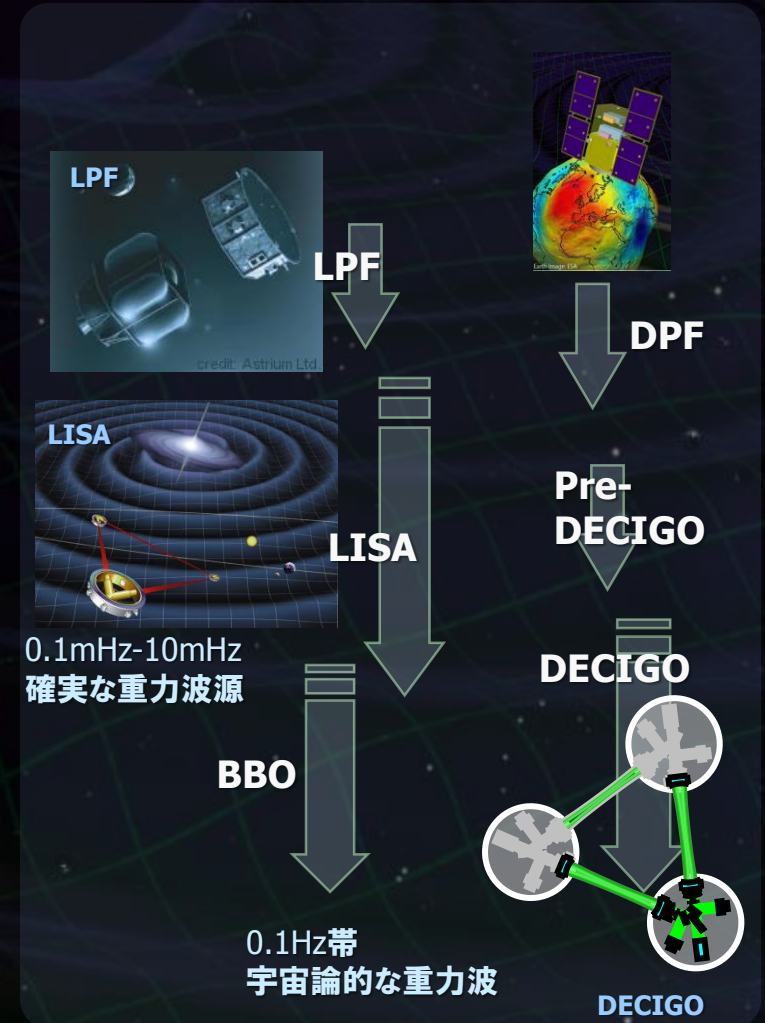
地上望遠鏡

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)



重力波コミュニティでの議論.

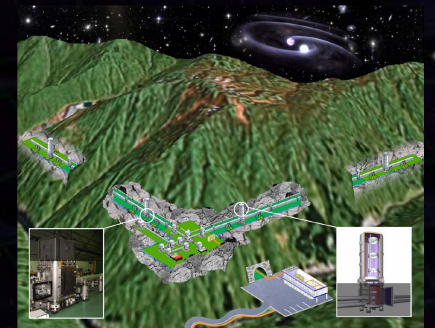
- ・国内の重力波研究分野 JGWC(注1)でのコンセンサス:
「まずKAGRAにより重力波初検出を行い、
その後DECIGOで天文学として展開する。」
- ・地上望遠鏡とは異なった観測時期、目指すサイエンス(注2).

*注1 JGWC : Japan Gravitational Wave Communityの略.

*注2 観測周波数に応じて異なった観測対象になる. 電磁波観測における電波-光赤外-X線などの関係と同じ.

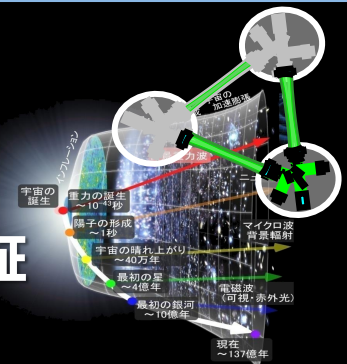
KAGRA : 地上重力波望遠鏡.

- 目的: 重力波天文学の創成.
- 主に200Mpc程度以内にある中性子連星合体などの高エネルギー天体現象の観測.
- 建設中, 2017年本格観測開始.



DECIGO : 宇宙重力波望遠鏡.

- 目的: 宇宙における物質起源への知見・宇宙論.
- 電磁波では直接観測できない初期宇宙の観測など.
- 2030年前後の実現に向け、前哨衛星DPFでの技術実証
→ DPFをイプシロン搭載小型ミッションとして提案中.



•JGWC (Japan Gravitational Wave Community) : 325名



•DPF WGメンバー : 109名 (DECIGO WG 148名)

DECIGO/DPF開発だけに

参加するメンバーも多い。

- 宇宙用干渉計開発・無重力実験
- 安定化レーザー開発
- スラスタ開発
- 衛星システム検討/ドラッグフリー



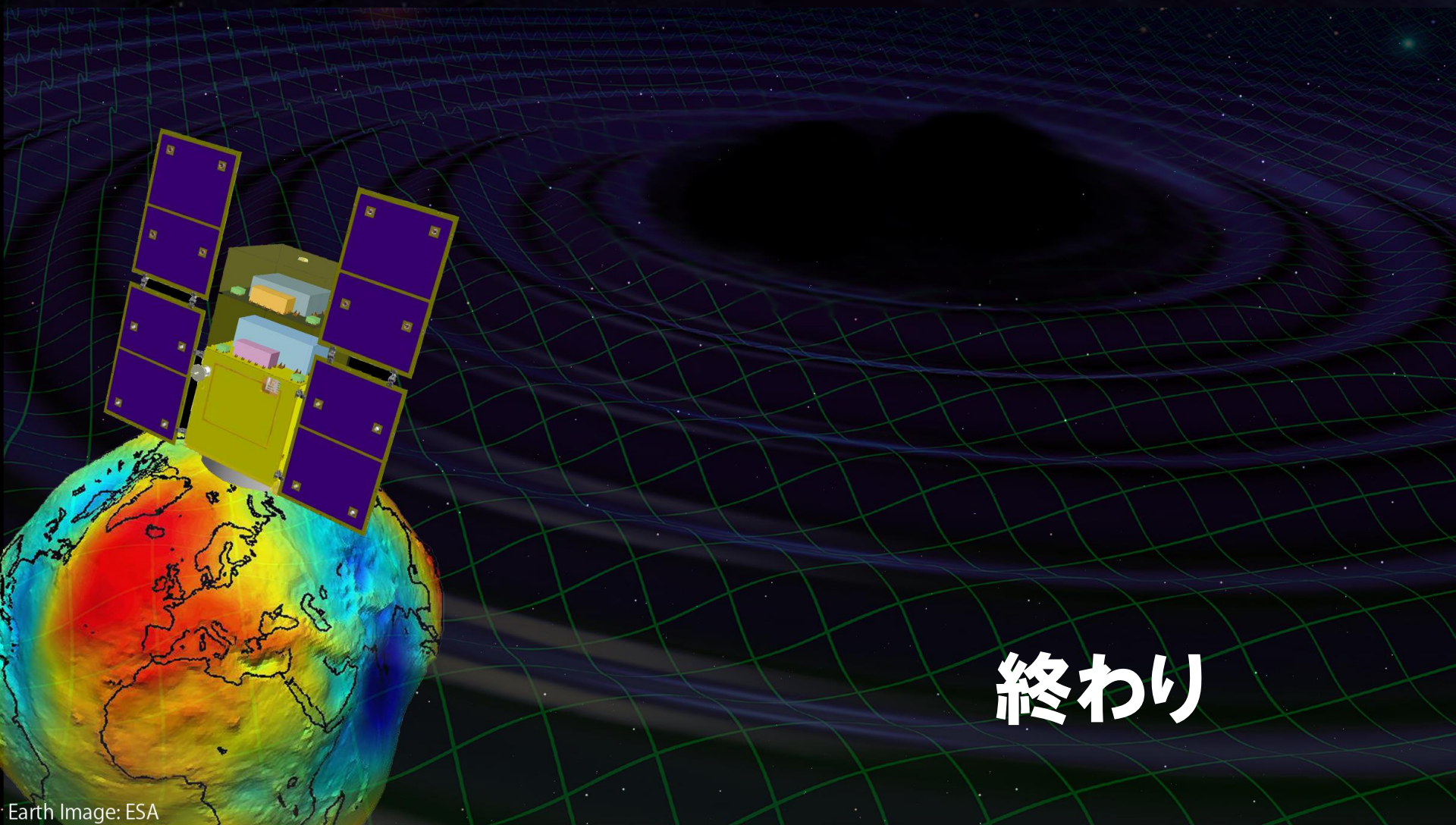
このうち11名が
KAGRAのコアメンバー

天文学・宇宙物理学は何を目指している？

- ・天体や天文現象、宇宙のことを調べ、理解すること。
- ・私たちの頭上にある 月・惑星・恒星から遠くの銀河などを対象にする。

- ・宇宙の誕生と成り立ちを知る。
- ・極限状態の物理を知る。
- ・地球・生命の誕生と歴史を知る。

→ 重力波観測は、これらに貢献する可能性!



終わり

Earth Image: ESA

• 重力波の初検出 → 新しい天文学の創生.

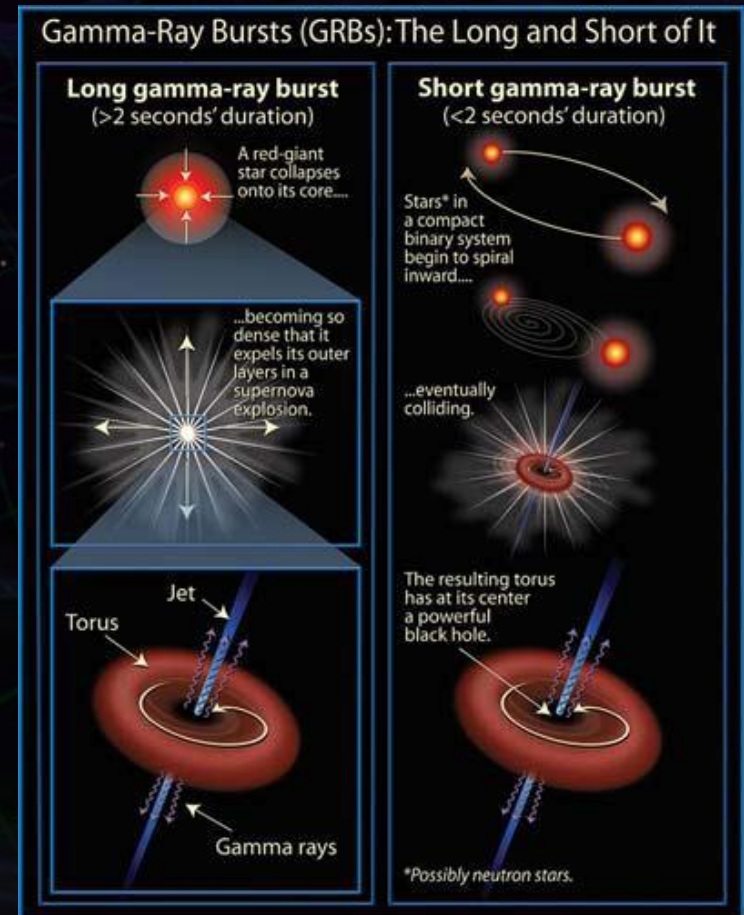
- 連星中性子星 : 確実に存在, 波形予測可能.
- ガンマ線バーストの起源, 未知の発見.
- 相対性理論/重力法則の検証.

• 高密度核物質の直接探査.

- 中性子星の状態方程式の情報.
- r-過程 → 元素組成・宇宙の化学進化.

• 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



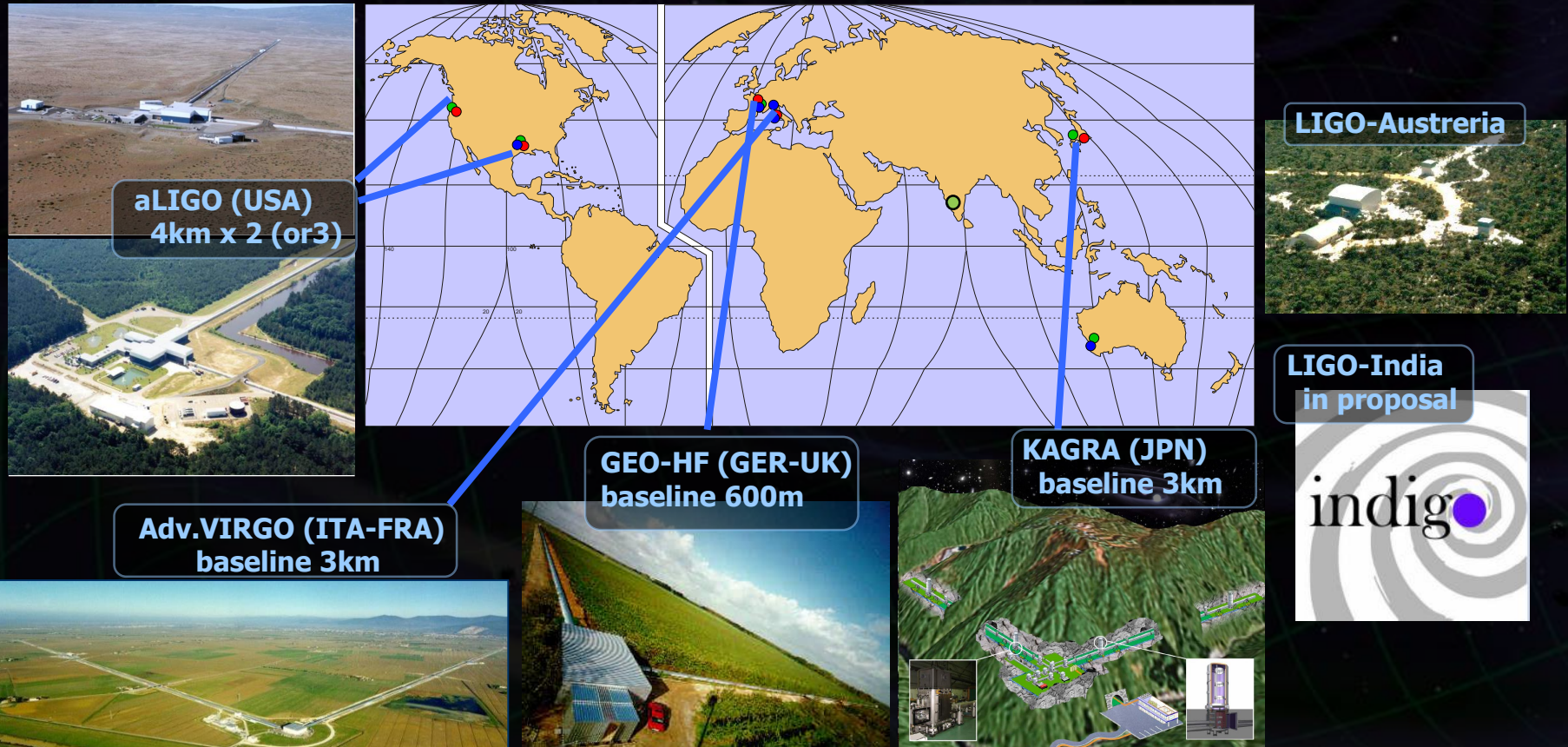
From encyclopedia of science

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)

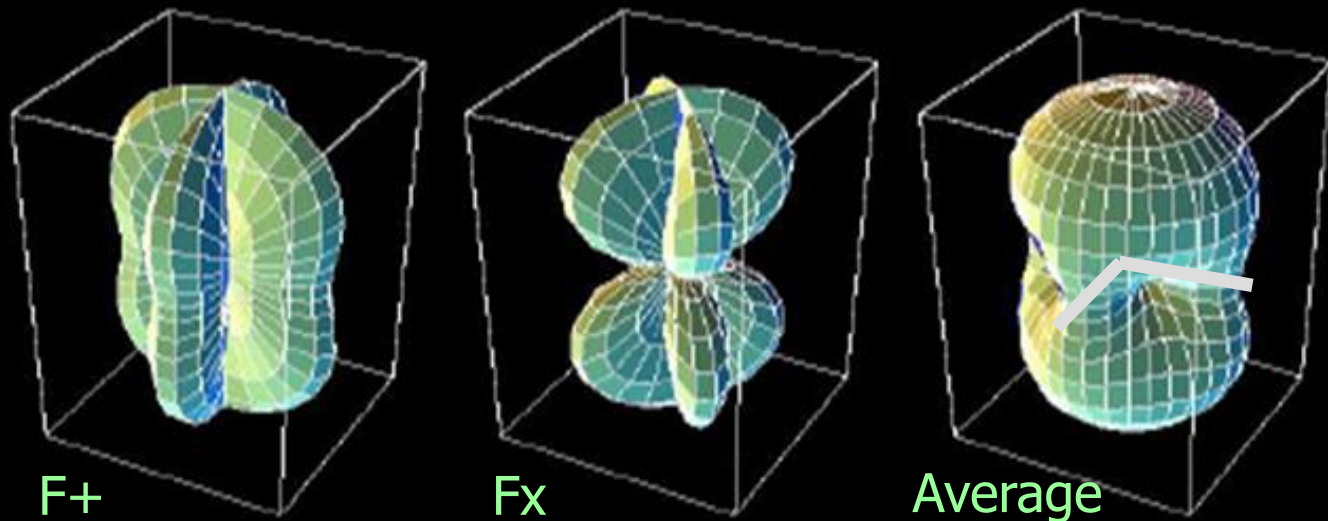
→ 重力波天文学

(重力波の検出, 波源位置の特定, 波源の物理情報, ...)



干渉計型重力波検出器: 指向性・偏波依存性が小さい.

干渉計のアンテナパターン



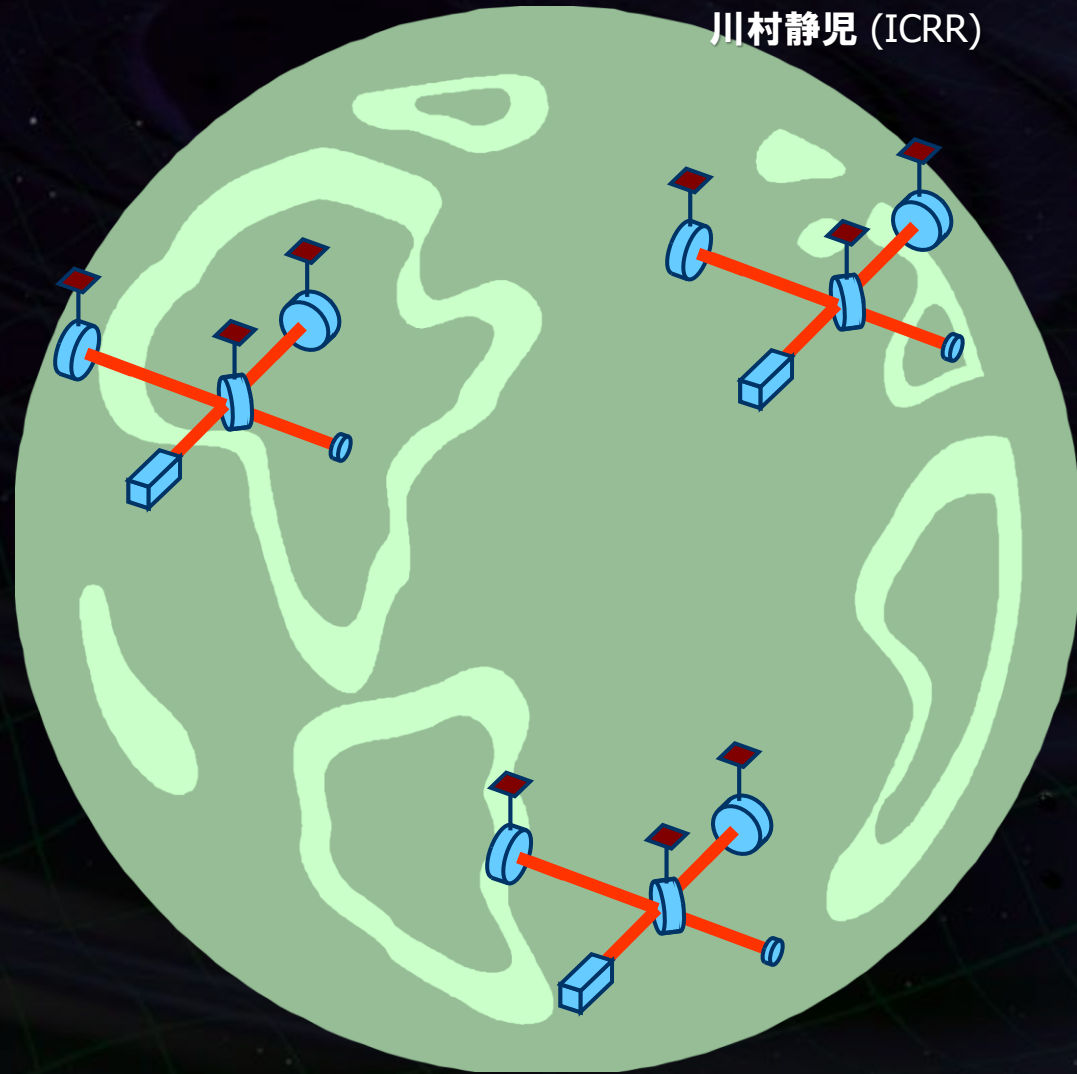
⇒ 1台の干渉計で重力波源を特定することはできない.

アニメーション：
川村静児 (ICRR)

複数台で同時観測



到着時間の差から
波源の方向が分かる！



海外望遠鏡との比較

	2 nd -generation detectors		3 rd 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スケジュールと予算

FY2010 FY2011 FY2012 FY2013 FY2014 FY2015 FY2016 FY2017

「最先端研究基盤整備事業」 (～98億円) → iKAGRA基盤設備 **ほぼ終了**

科研費 特別推進研究 (～5億円) → 低温・高感度化, 人件費 **申請中**

建設

トンネル掘削経費 (～37億円) **ほぼ終了**

概算要求 (～20億円) → 設備準備

予算・主旨

研究協力

新学術領域研究 (～8億円, ～3億円 for GW) → マルチメッセンジャー天文学

拠点形成事業 (<1億円) → 国際協力

KAGRA構成



Upgrade



目標

施設・望遠鏡基盤の整備

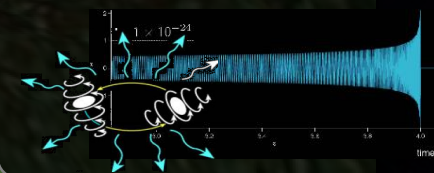
重力波の検出と天文学

15サブシステム

- Tunnel
- Facility
- Vacuum system



- Data Management
- Data Analysis
- Geophys. IFO



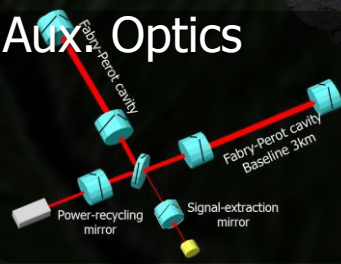
- Laser source
- Mirror



- Seismic iso.
- Cryogenic sys.



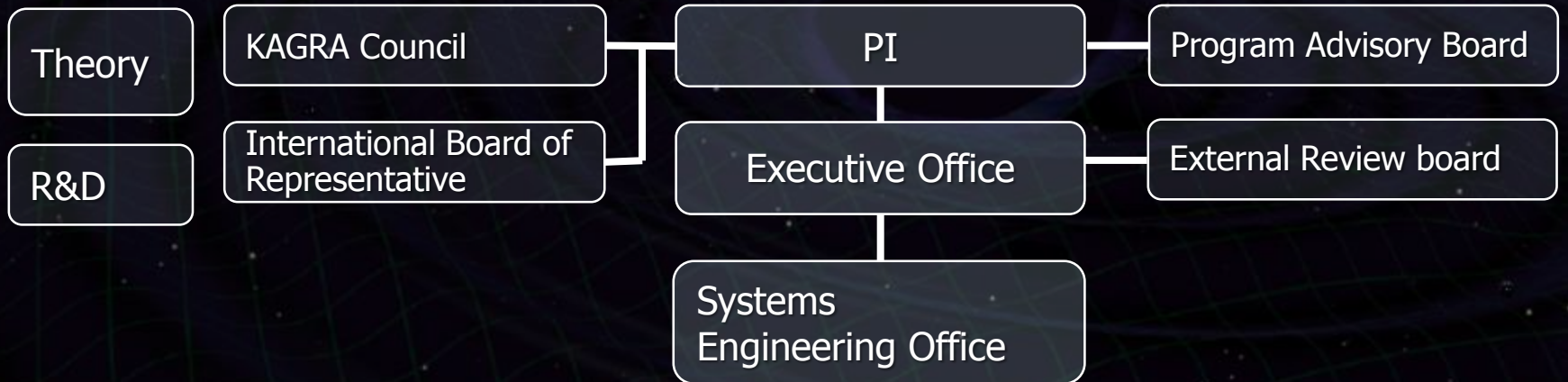
- Main IFO.
- In/Output Opts.
- Aux. Optics



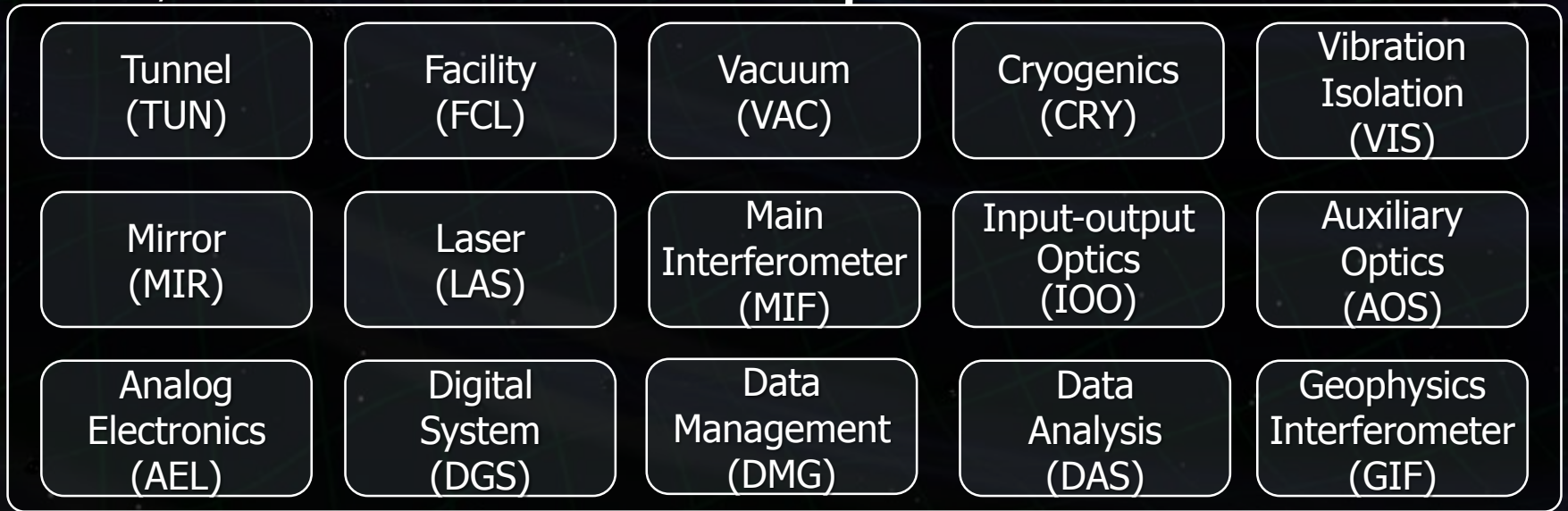
- Analog Elec.
- Digital Elec.



KAGRA Organization PI: T.Kajita (ICRR), PM: Y.Saito (KEK)

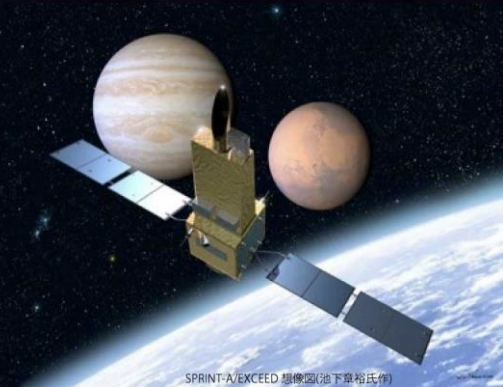


15 Subsystems



JAXAの小型科学衛星シリーズ

標準衛星バス + イプシロンロケットを利用して
比較的高頻度で 小型科学衛星 を打ち上げる計画



SPRINT-A/EXCEED 想像図(池下章裕氏作)

小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED

1号機 ひさき (SPRINT-A) (2013年)

UV望遠鏡による惑星観測

2号機 ERG (SPRINT-B) (~2015年)

地球周辺の磁気圏観測



DPF: イプシロン搭載小型ミッションを目指す



Epsilon Rocket Booster
Photo by JAXA