

# 重力・重力波物理学



安東 正樹 (京都大学 理学研究科)

# 目次

1. イントロダクション
2. 重力波
3. 微小距離重力
4. まとめ



# 1. イントロダクション

⇒ 重力・重力波物理学



# 研究目標

## 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。

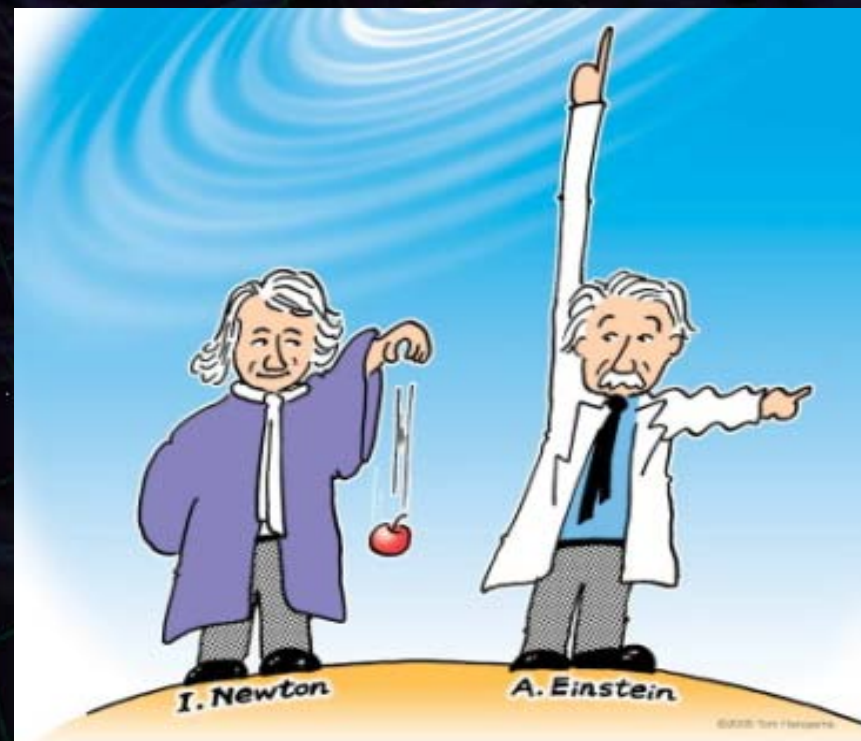
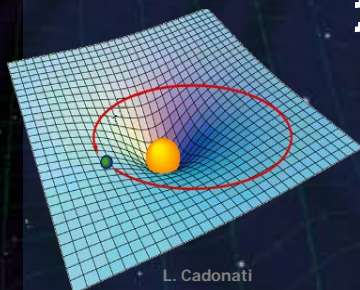


イラスト Tom Haruyama

# 重力と重力波

## 一般相対性理論

重力を時空の性質と解釈



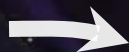
アインシュタイン方程式

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

時空の歪み

質量  
(エネルギー・運動量)

変動成分



## 重力波

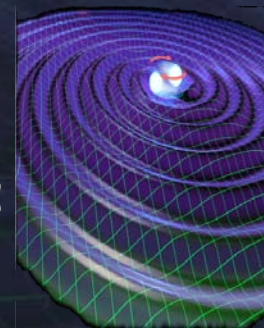
重力波天文学

宇宙を探る新しい目

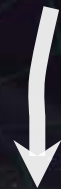
激しい天体現象の中心部

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



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

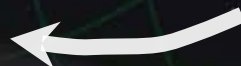
量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧

熱雑音, 地面振動

信号処理

測定



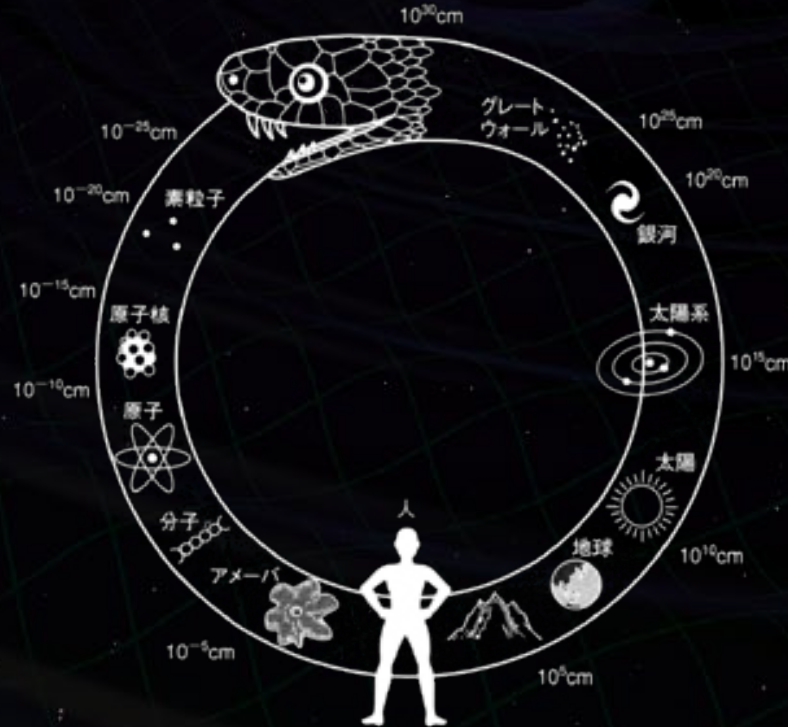
# 重力・重力波物理学

時空の成り立ち  
を探る

## 重力

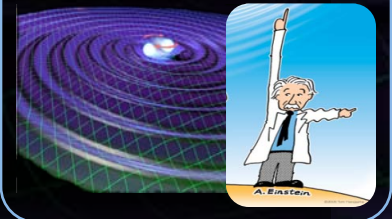


## 宇宙の 成り立ちと進化



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」

## 2. 重力波

⇒ 重力波天文学

LCGT

DECIGOと前哨衛星

振じれ型重力波検出器



# 重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team



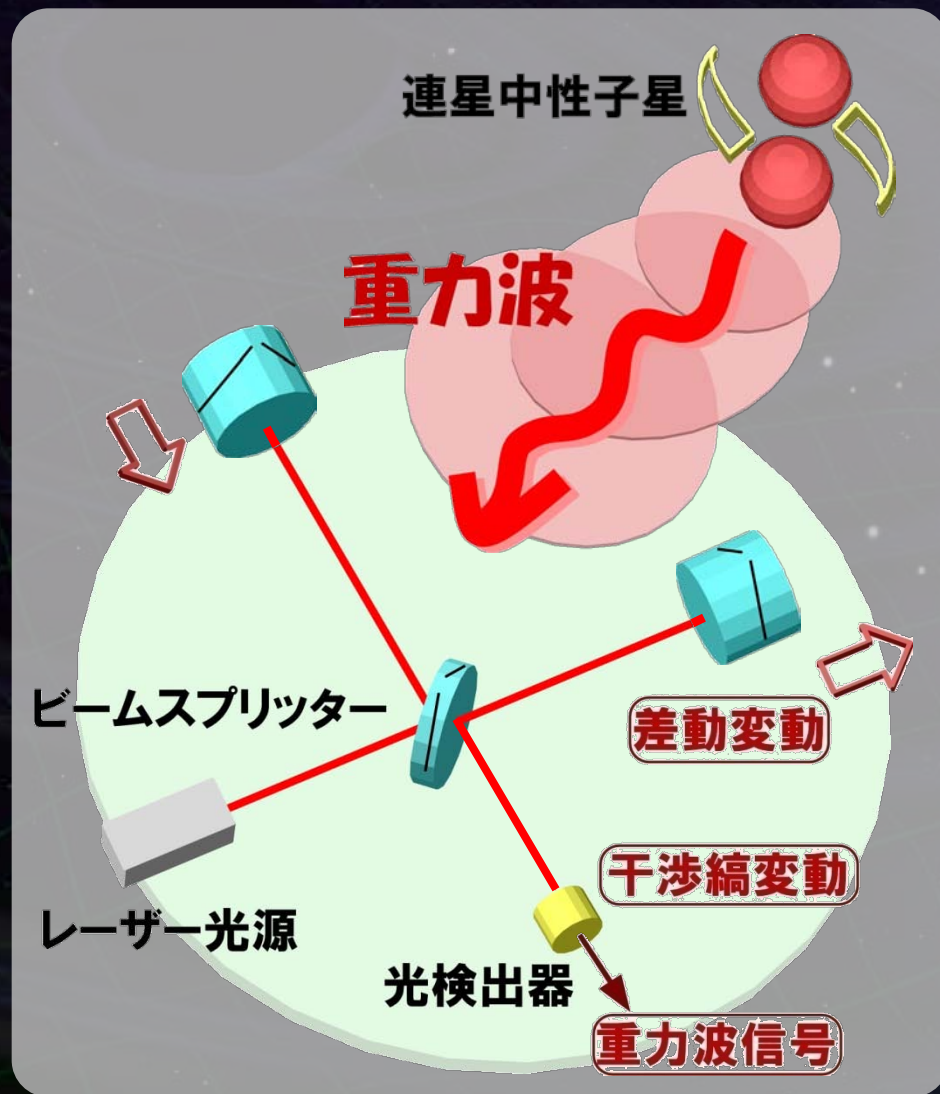
# レーザー干渉計型重力波検出器

重力波による基線長変動



腕の長さの差動変動を  
干渉光量の変動として検出

- 長基線長  
→ 重力波効果の累積  
外乱変動の影響を抑える
- 大光量  
→ 光の量子雑音の抑圧

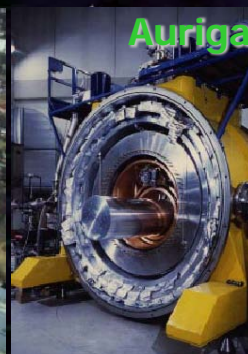


# 重力波検出器の現状

検出の試み：1960年代より行われる

現在、大型検出器が稼働中

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

→ 検出の信頼度向上、波源の方向特定、重力波偏波の分離  
1年を超える観測データ

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

# 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)

M.Ando et. al, PRL 86 3950 (2001)

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)



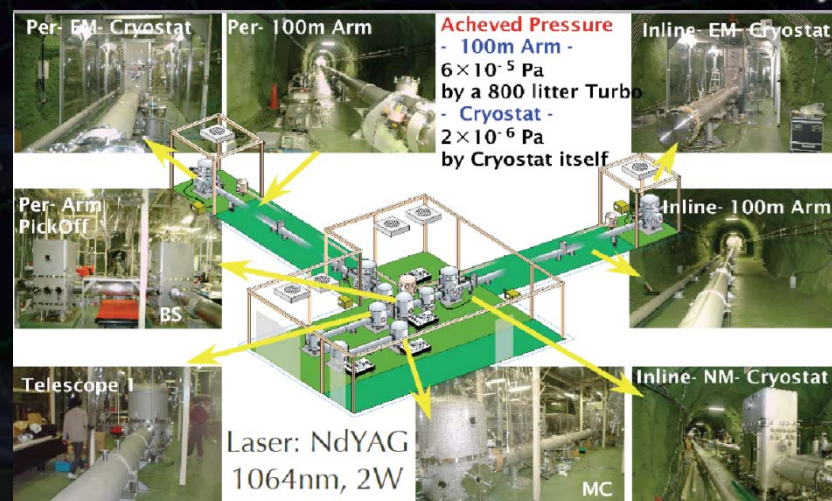
## CLIO (2002~)

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



# 本格的な天文学

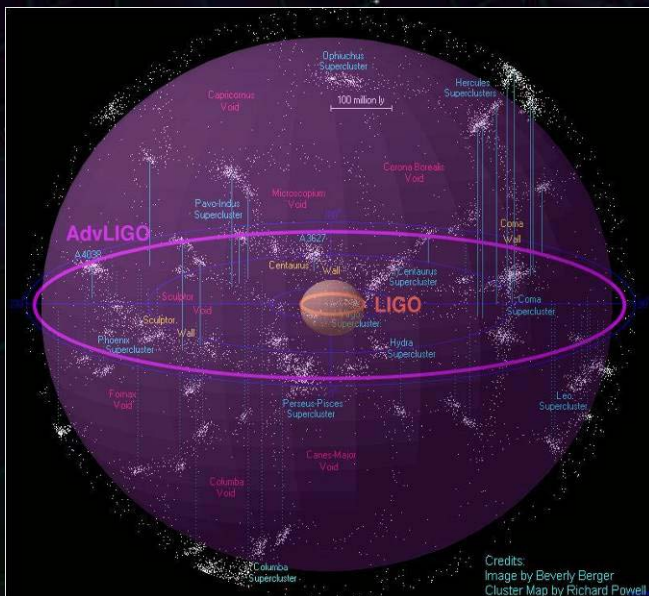
現在の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

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

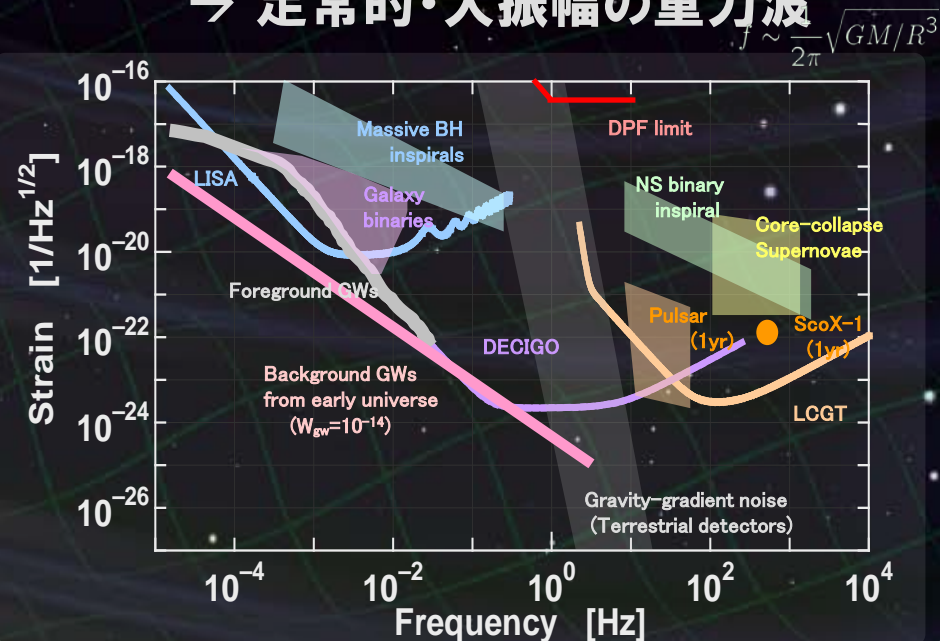
高感度化

→ より多くの銀河をカバーする



観測帯域を広げる

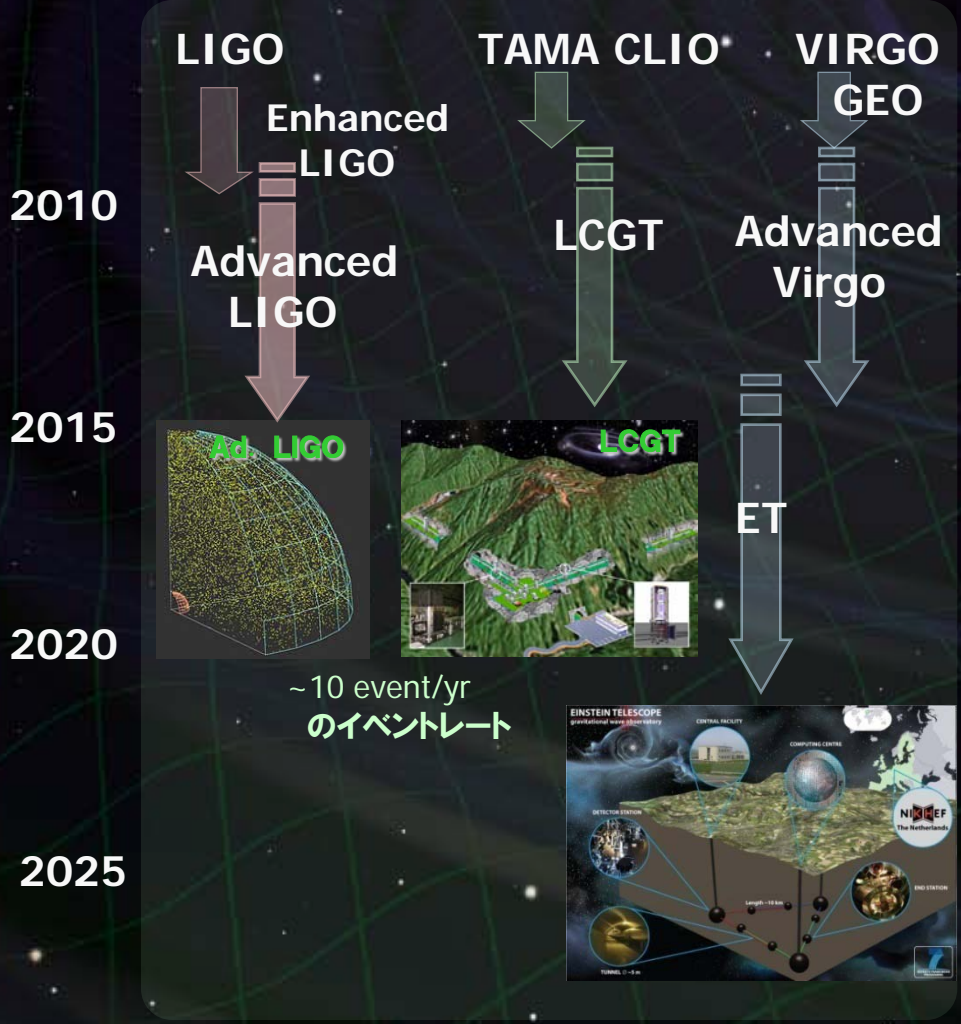
→ 定常的・大振幅の重力波



# 重力波天文学のロードマップ

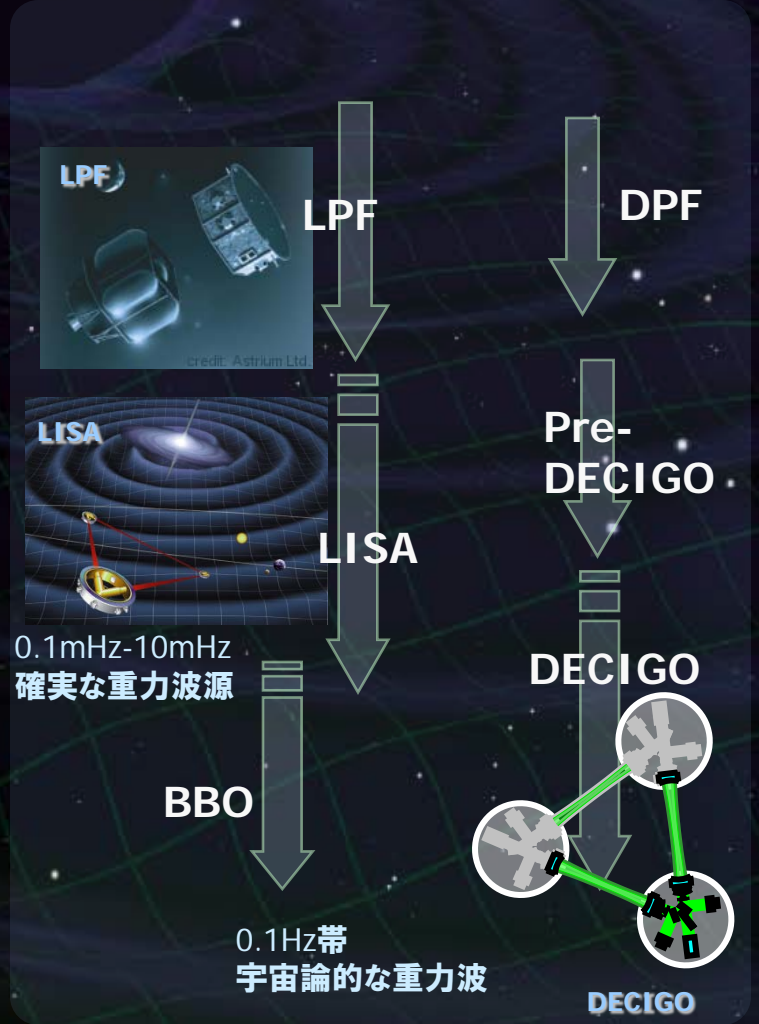
## 地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



## 宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測



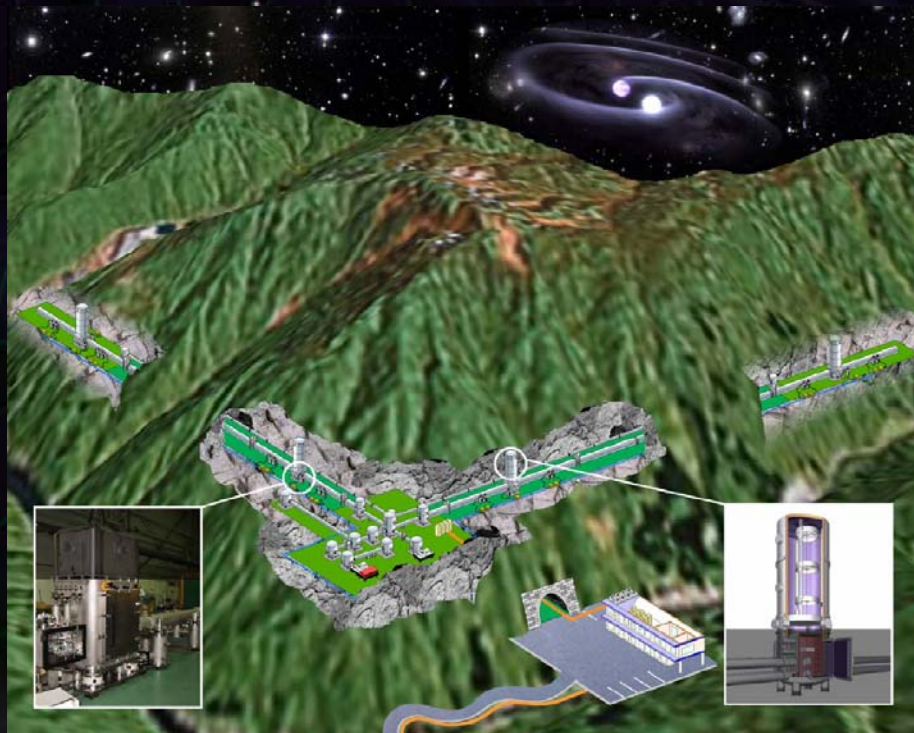
# LCGT と DECIGO

## 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

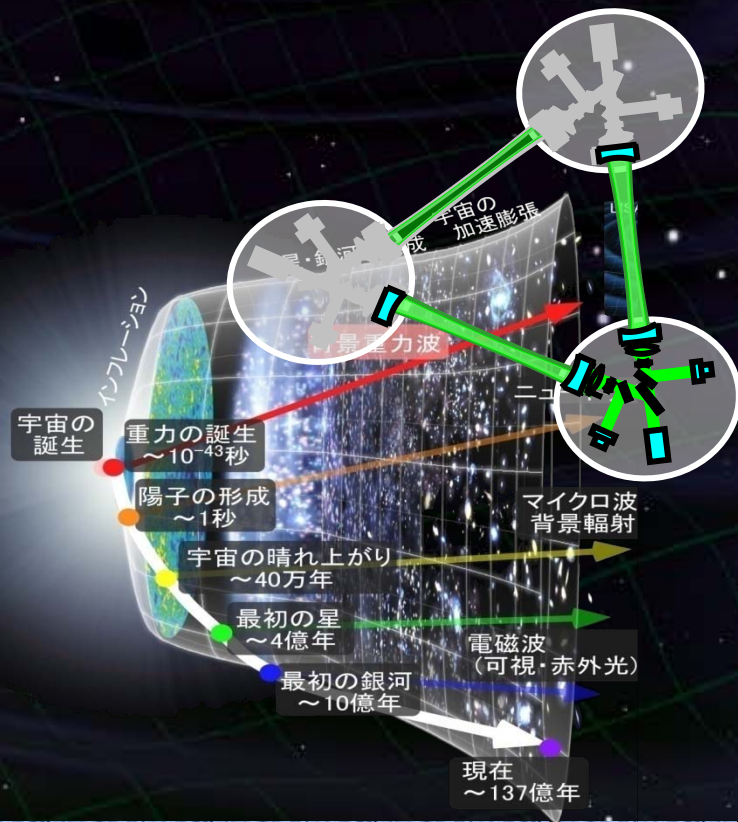


## DECIGO (~2027)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開



## 2. 重力波

重力波天文学

⇒ LCGT

DECIGOと前哨衛星  
振じれ型重力波検出器



# LCGT

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

### 日本の次世代重力波検出器

Ad. LIGOなどと同等の感度

初期観測 2014-, 本格観測 2017-

文部科学省  
「最先端研究基盤事業」  
に採択され、建設開始。



### 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

Sensitivity curve  $\rightarrow$  120 Mpc (SNR 8, 天球上の位置・偏波平均)

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:

$$\mathcal{R} = 83.0^{+209.1}_{-66.1} \text{ [events/Myr]}$$

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

 LCGTの観測レート **6.9 events/yr**

その他: 超新星爆発, パルサー, 背景重力波

# 成功確率

1年間の観測で、少なくとも1回以上  
重力波を検出できる確率: 99.9%

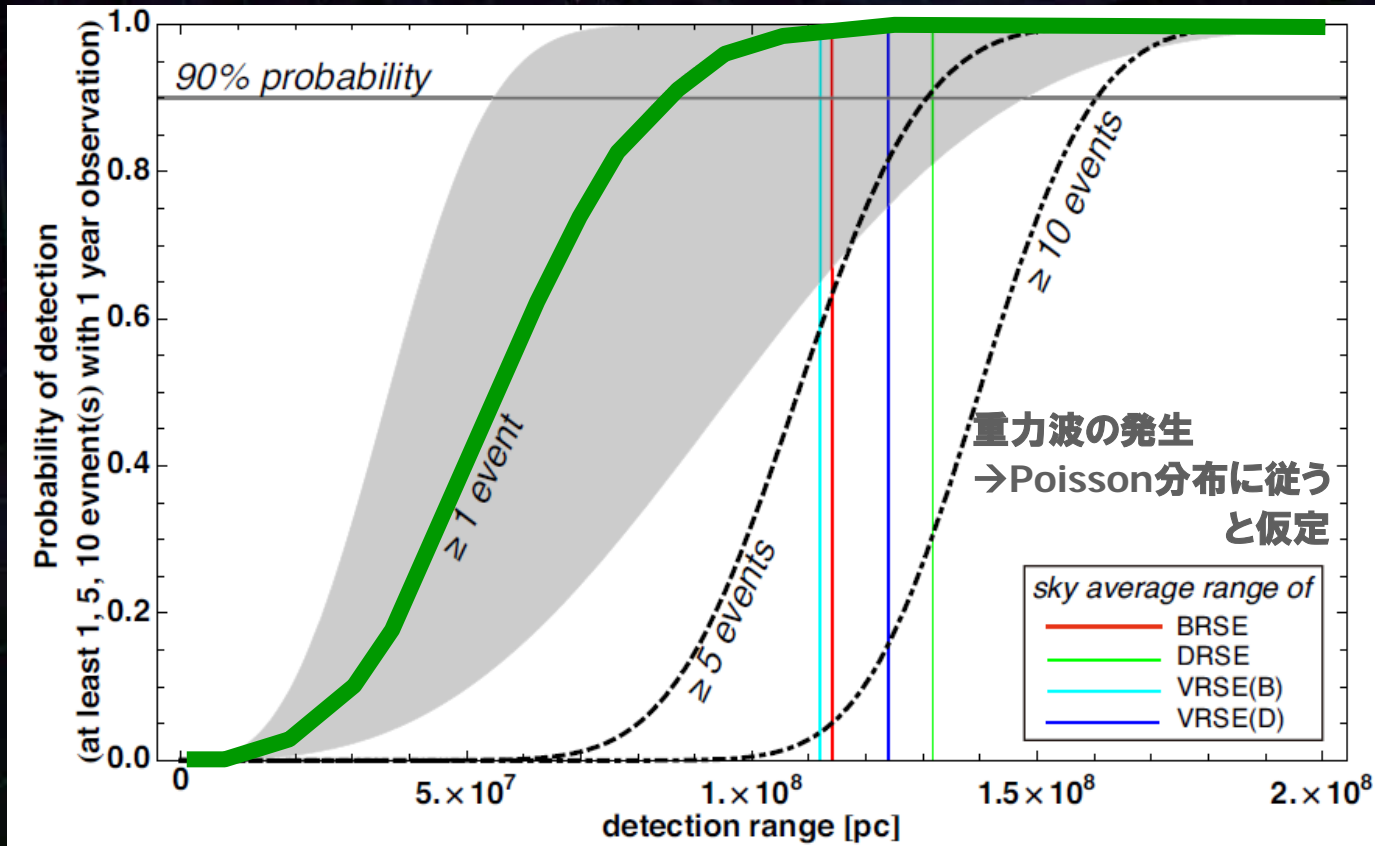


Figure  
N.Kanda

# 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

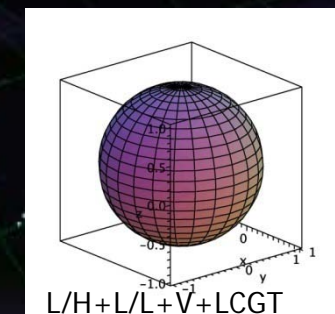
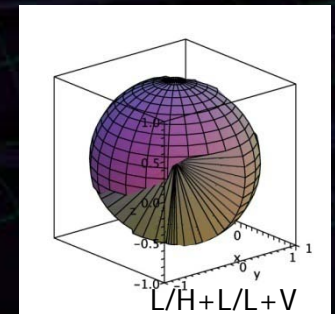
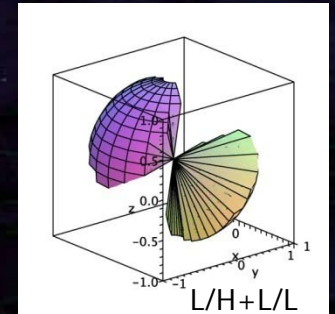
### 実際上の意義

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



# 第3世代 重力波望遠鏡

## ET (Einstein Gravitational-Wave Telescope)

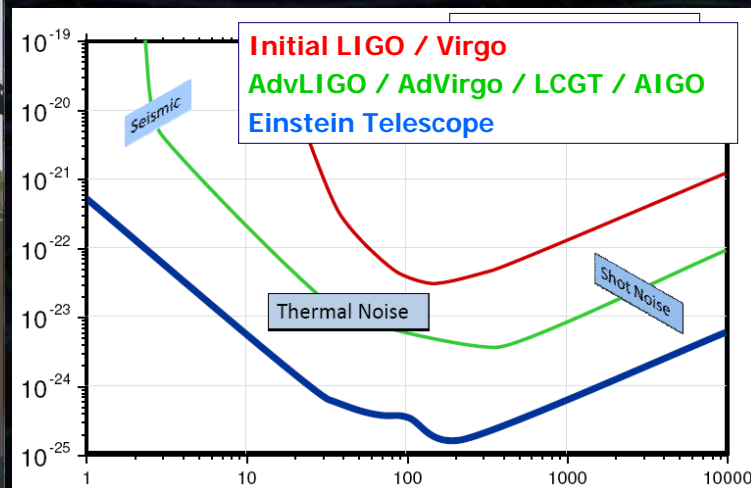
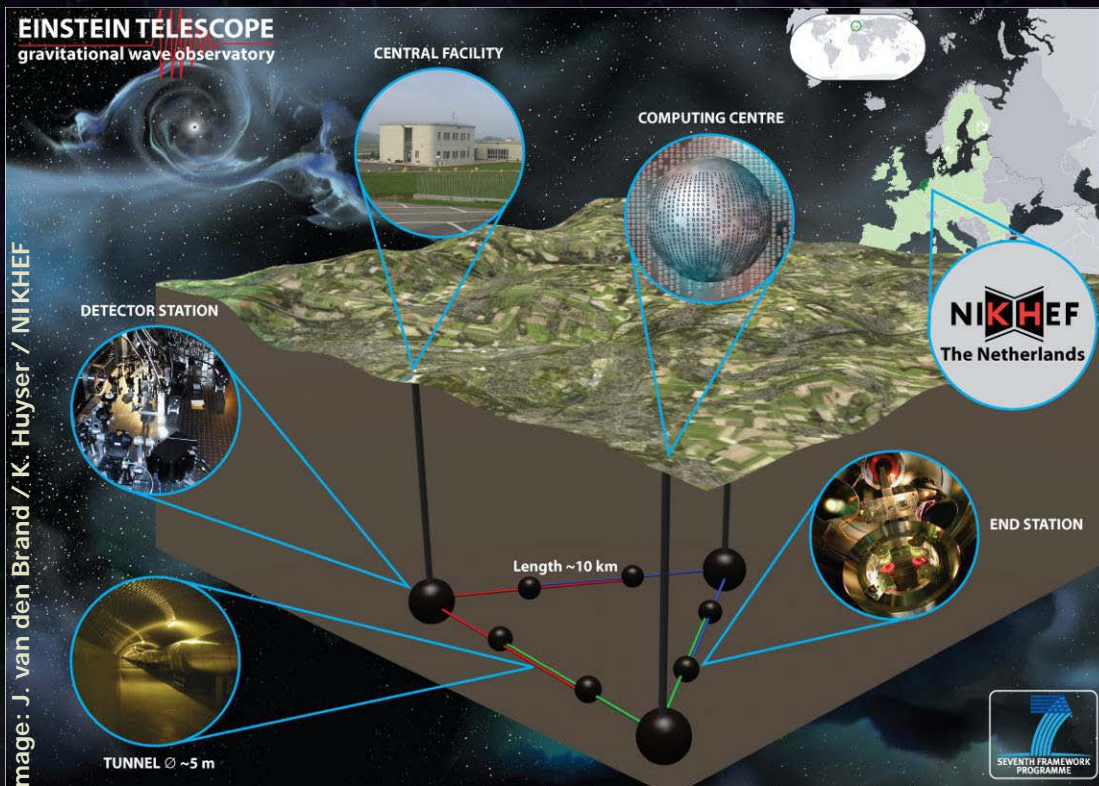
ヨーロッパの計画

基線長10-30kmの低温・地下干渉計

Advanced LIGO/ LCGT の10倍の感度を目指す

2021年 観測開始?

← LCGTは、第2.5世代の望遠鏡と言える。



M. Punturo, GW Advanced Detector Workshop, May 2008

## 2. 重力波

重力波天文学

LCGT

⇒ DECIGOと前哨衛星 (DPF, SWIM)  
振じれ型重力波検出器



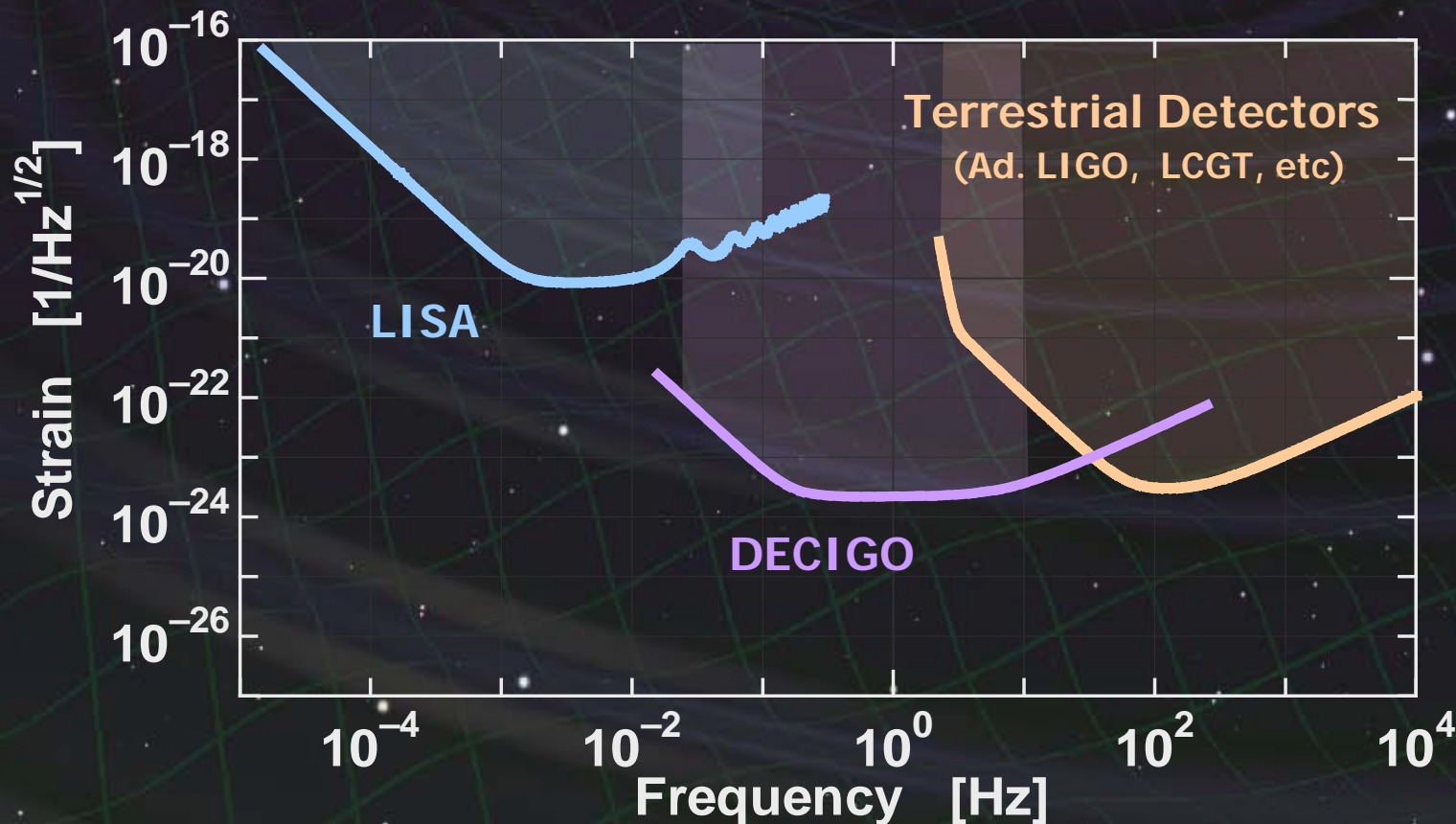
# DECIGO

DECIGO (Deci-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (~2027)  
観測周波数帯 ~0.1 Hz



LISA と 地上重力波望遠鏡  
の間の周波数を狙う



# 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

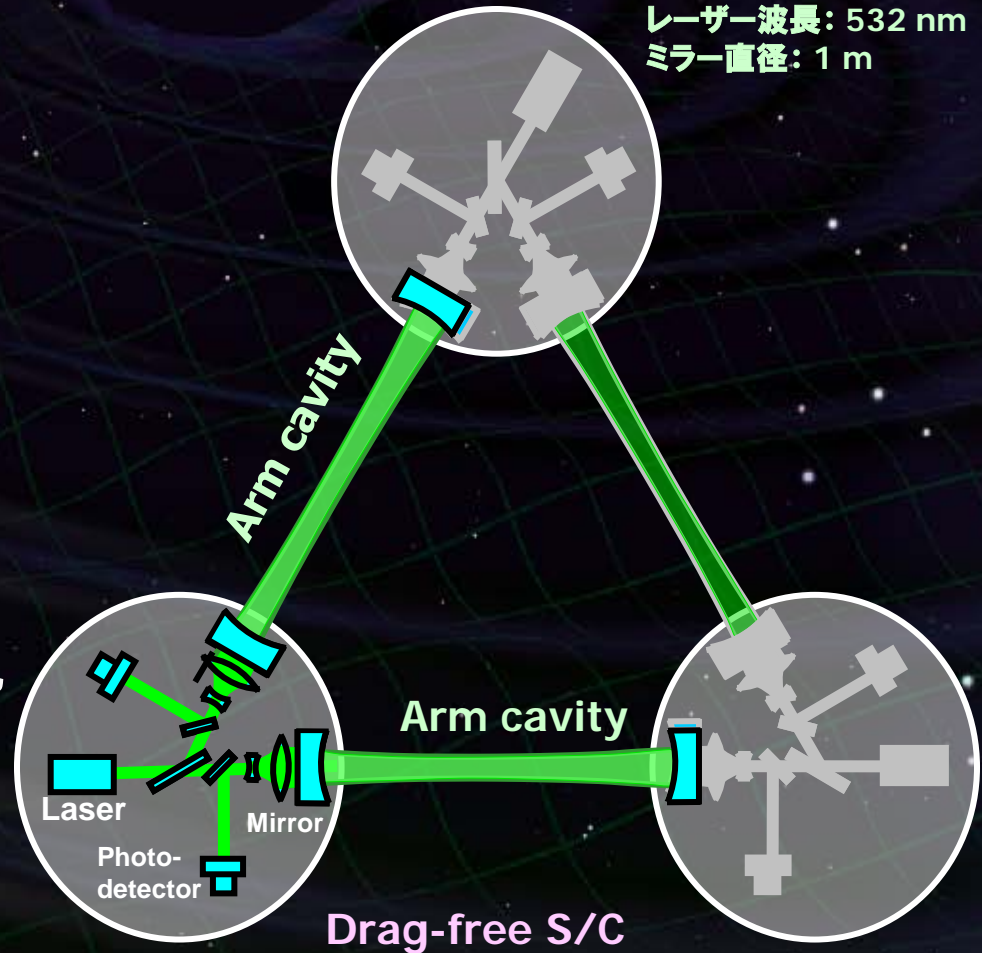
太陽公転軌道

最大4ユニットで相関をとる



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

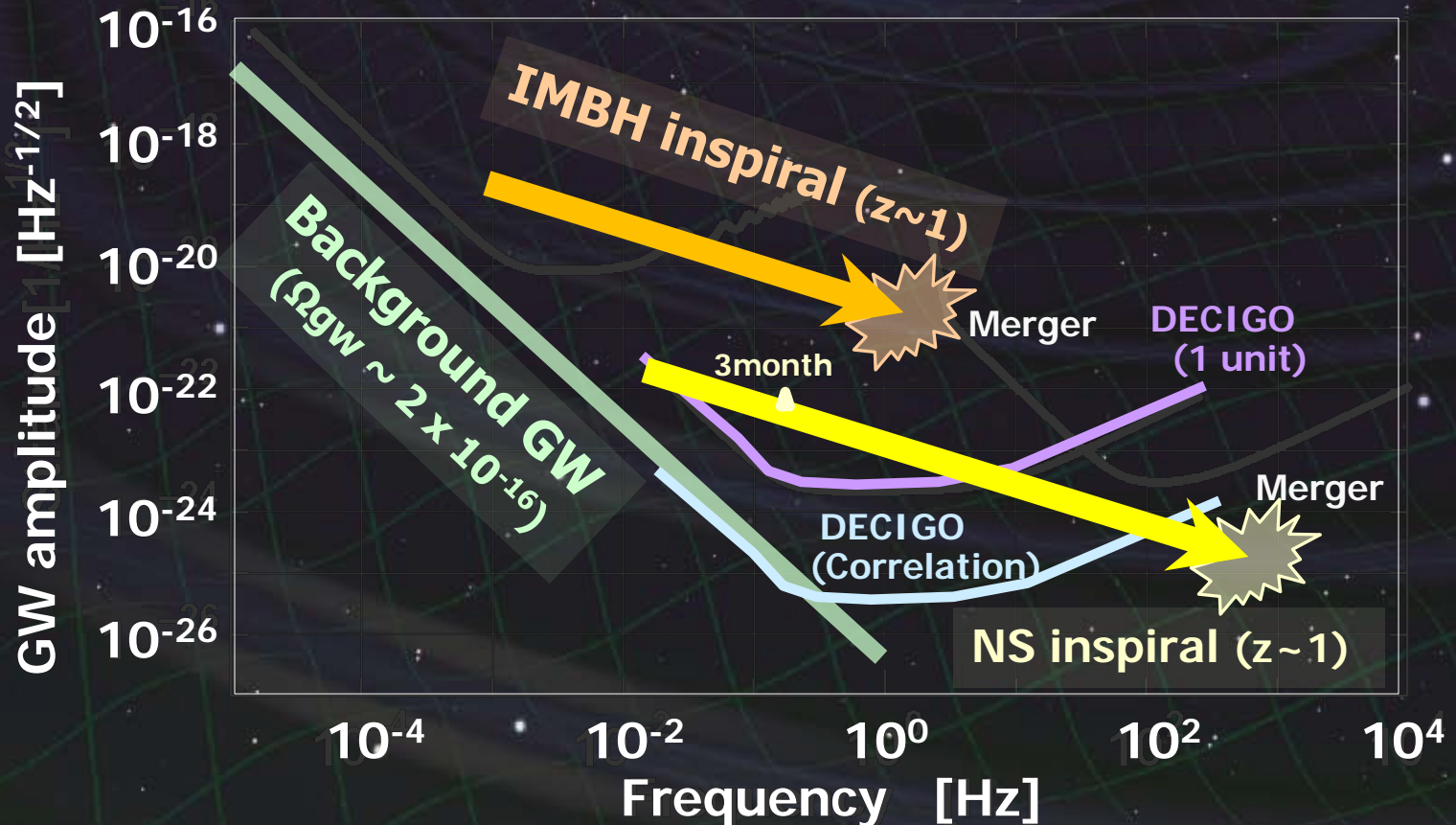


# DECIGOの観測対象

IMBH binary inspiral  
NS binary inspiral  
Stochastic background



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





# ダークエネルギーに対する知見

DECIGO will observe

$10^{4-5}$  NS binaries at  $z \sim 1$

↳ Precise 'clock' at cosmological distance

## 'Standard Siren'

Relationship between  
distance and redshift

Distance: chirp waveform

Redshift: host galaxy

→ Information on **acceleration**  
of expansion of the universe



Seto, Kawamura, Nakamura,  
PRL 87, 221103 (2001)

Determine cosmological parameters

**Absolute and independent measurement**

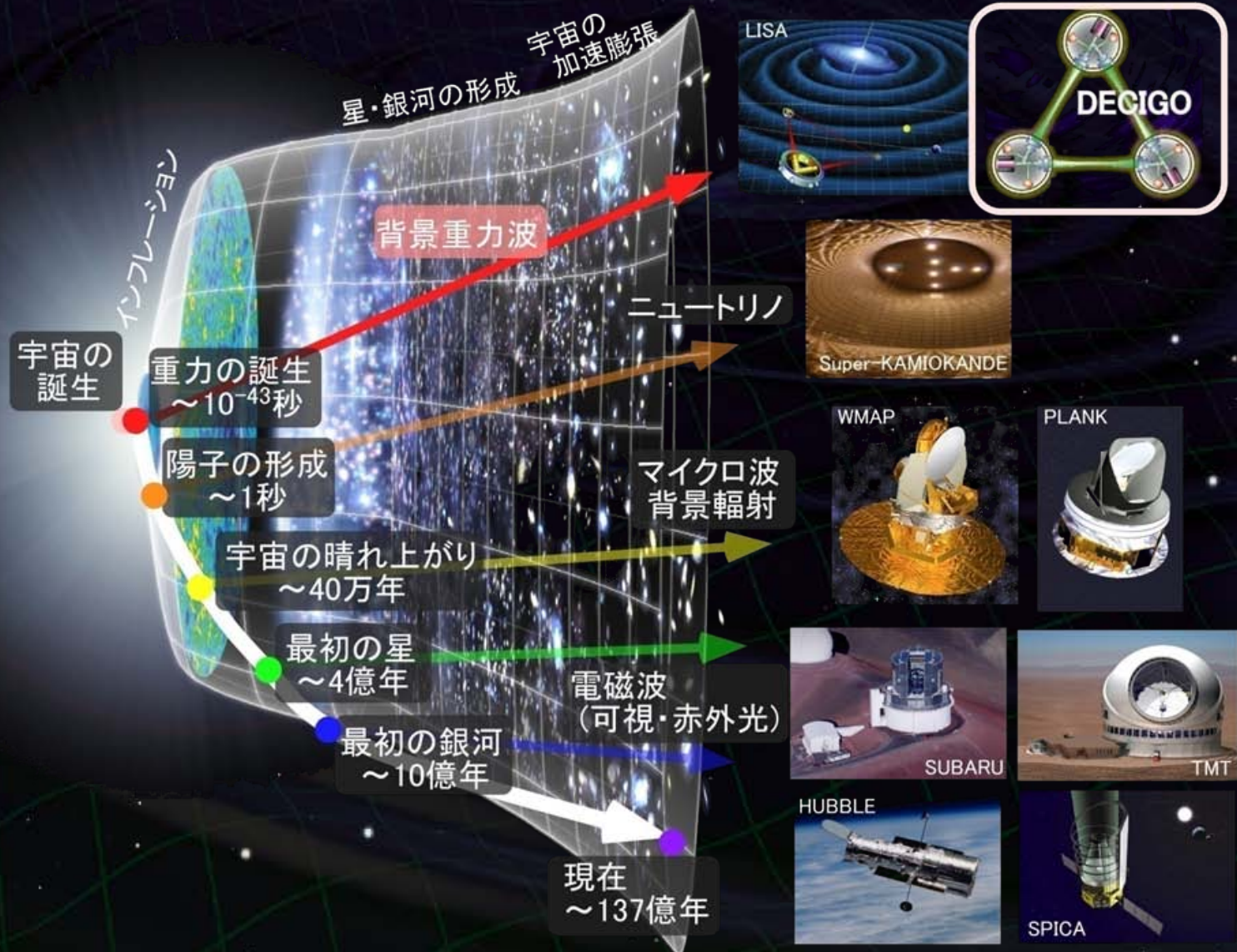
Angular resolution

$\sim 10$  arcmin (1 detector)

$\sim 10$  arcsec (3 detectors)

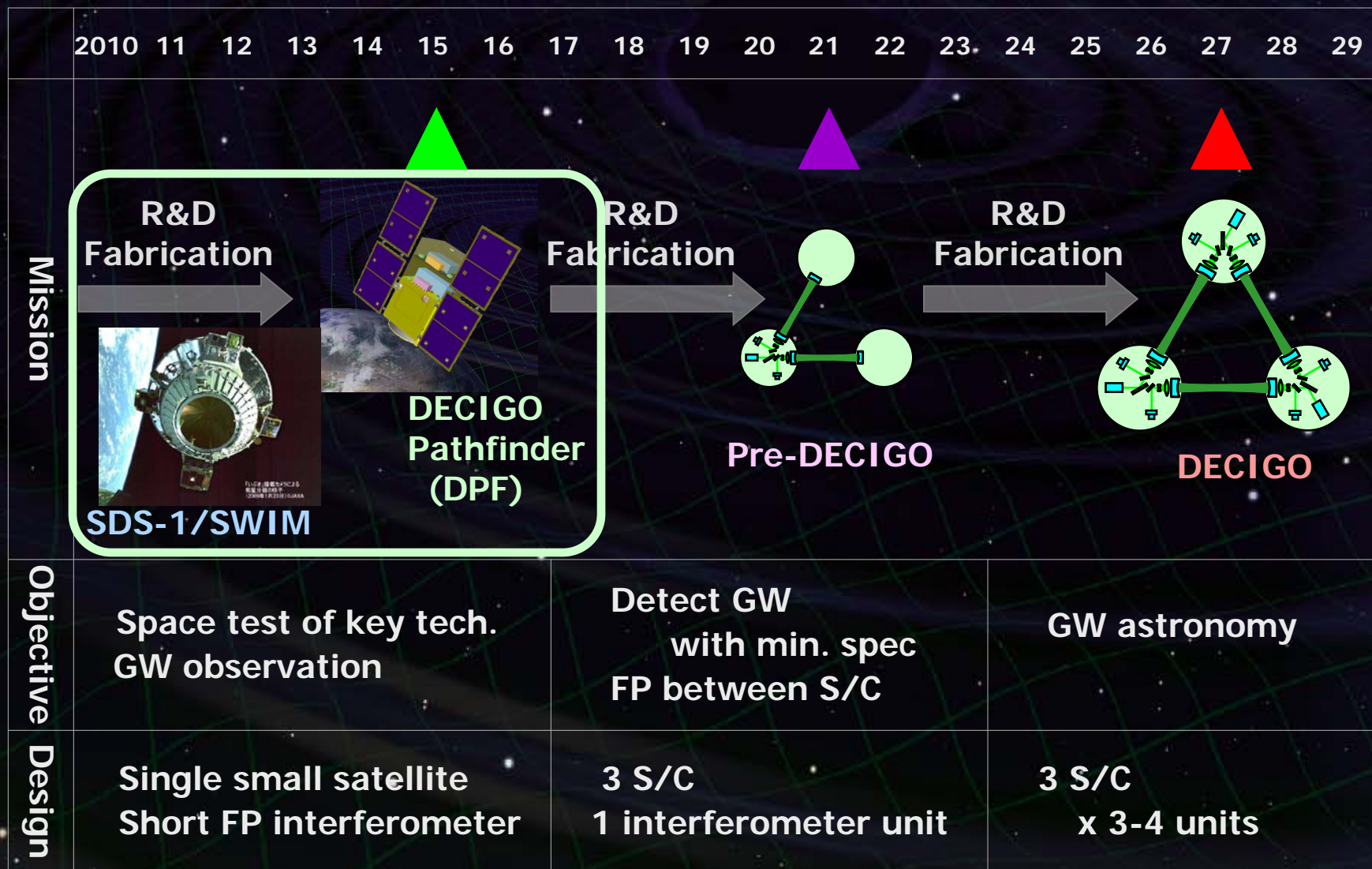
at  $z=1$

# 初期宇宙の観測



# DECIGO計画のロードマップ

Figure: S.Kawamura



# 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

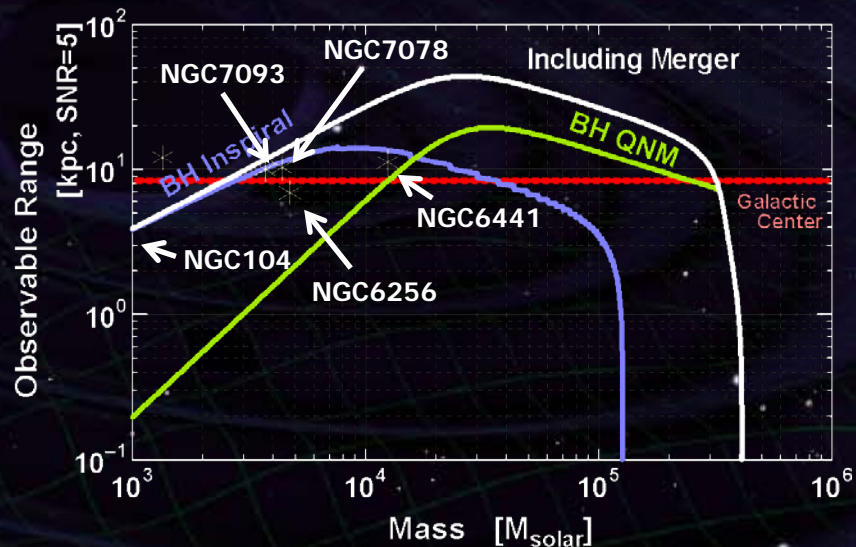
重力波により宇宙を見る

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

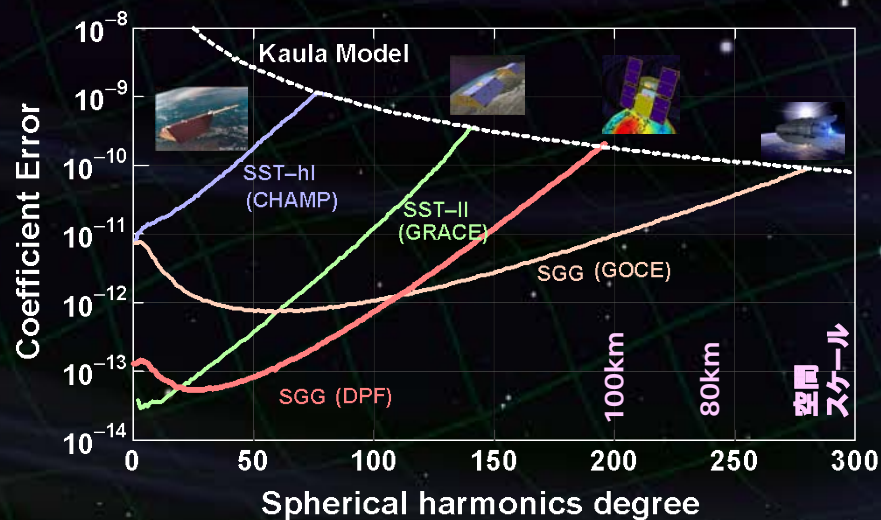
地球形状の計測

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

(2012-2016に国際観測網にギャップ)



# 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 (~2012年)

UV望遠鏡による惑星観測

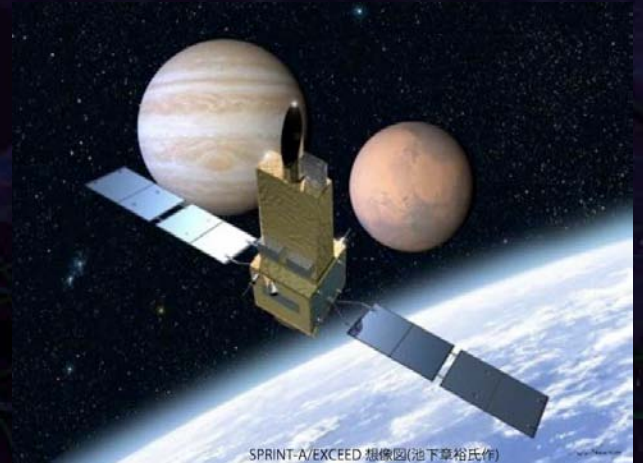
2号機 ERG (~2013年)

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 : 2015年度



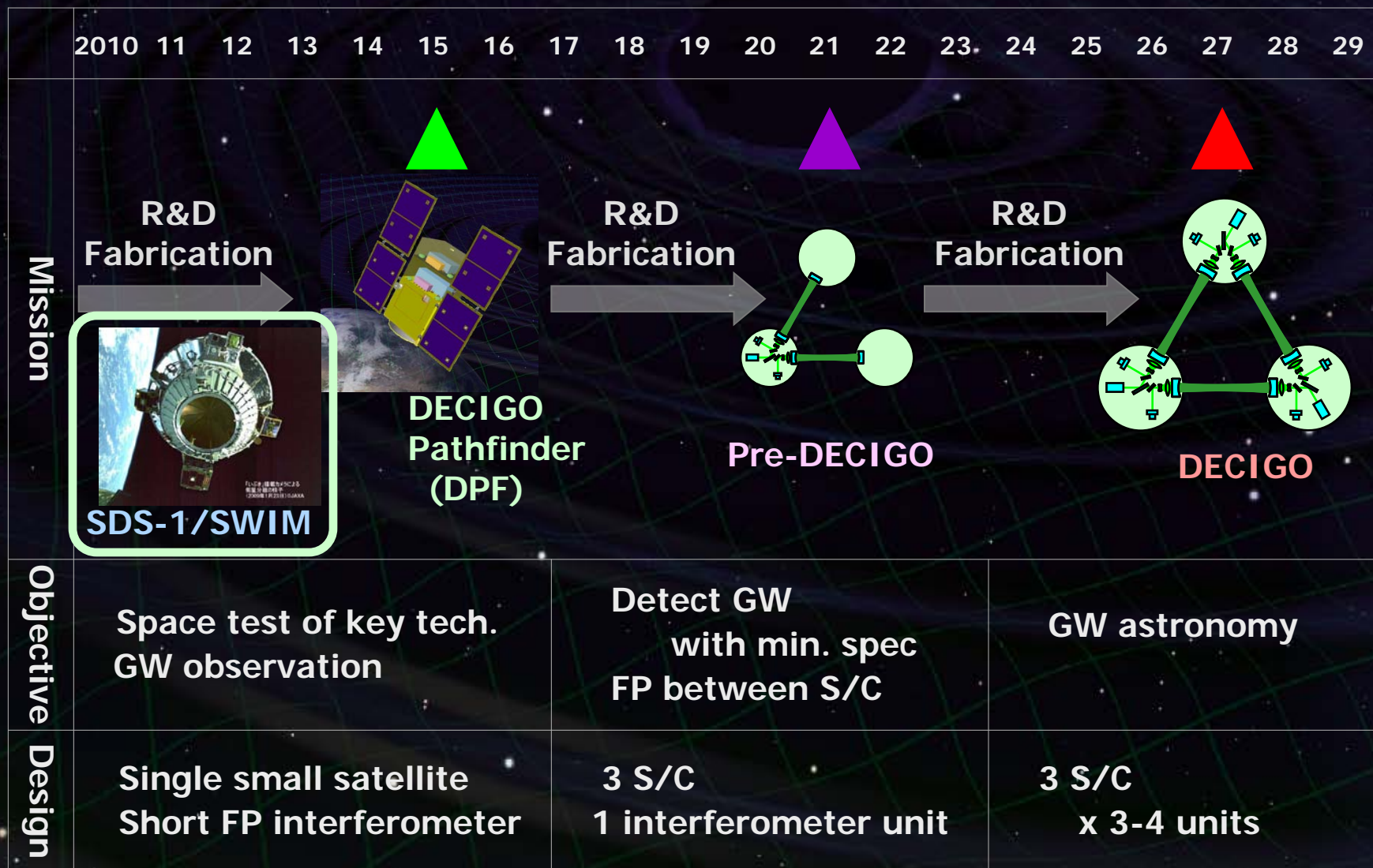
小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



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

# DECIGO計画のロードマップ

Figure: S.Kawamura



# SWIM $\mu$ v

物理学会誌「話題」欄  
に記事掲載予定

## 超小型宇宙重力波検出器 SWIM $\mu$ v代表: 安東

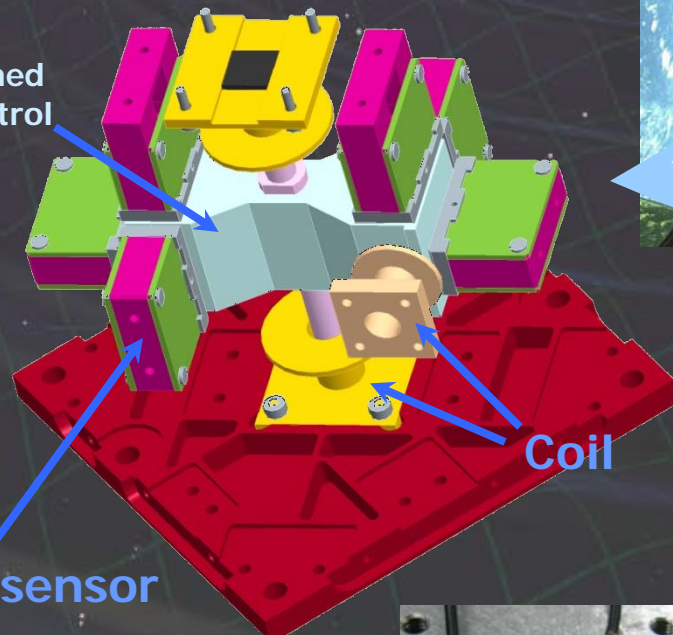
2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ **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

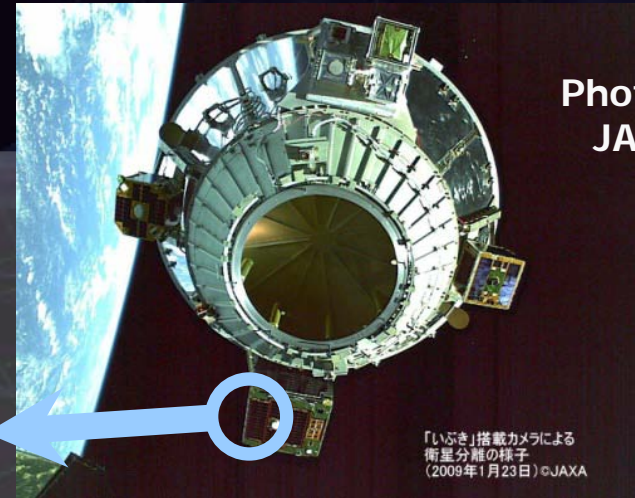
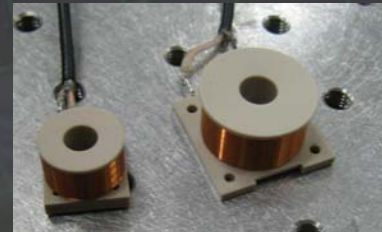
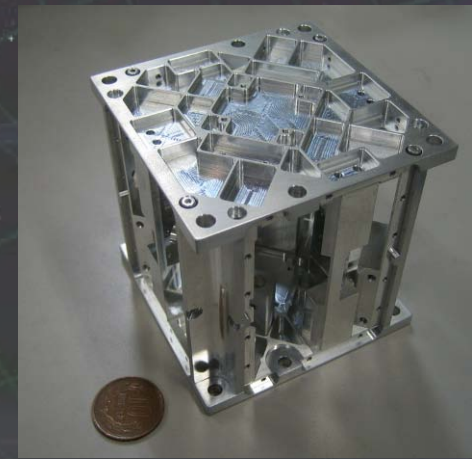


Photo:  
JAXA

「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

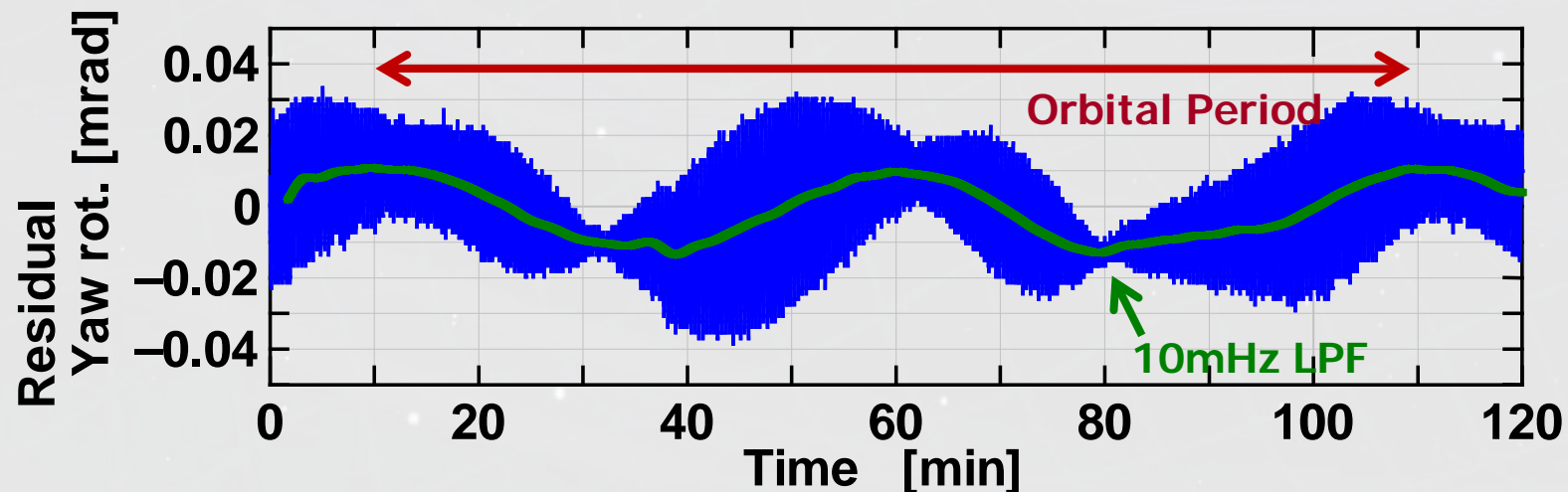
## 長時間データ取得

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

⇒ データ解析進行中



## 2. 重力波

重力波天文学

LCGT

DECIGOと前哨衛星

⇒ 振じれ型重力波検出器



M.Ando, et. al,  
PRL (in press)  
online Oct. 2010

# 歪み観測と振じれ観測

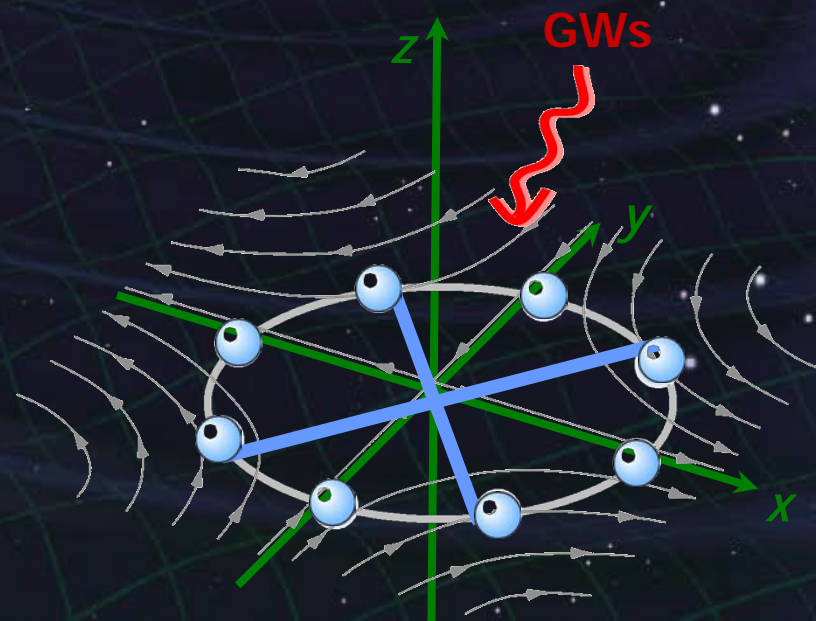
自由質点をレファレンスに、重力波による潮汐力変動を観測

Traditional IFO detector  
Detect differential length change



差動歪み変動  $h \sim \frac{\delta L}{L}$

Torsion Detector  
Detect differential rotation

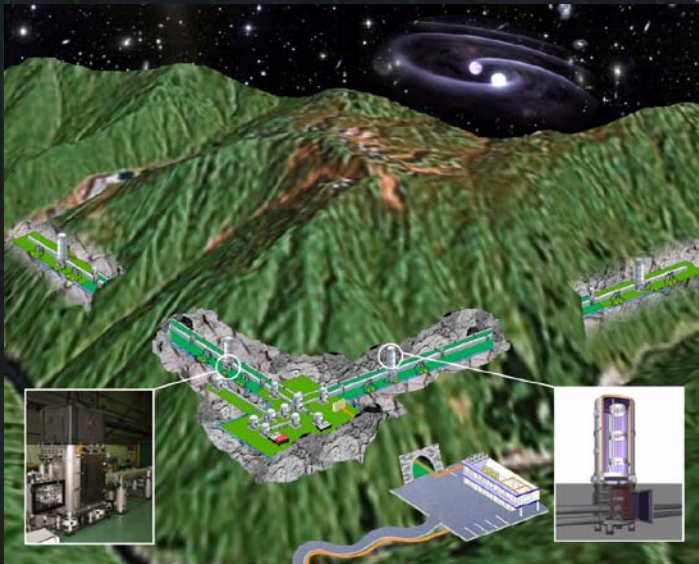


差動振じれ変動  $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$

# 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

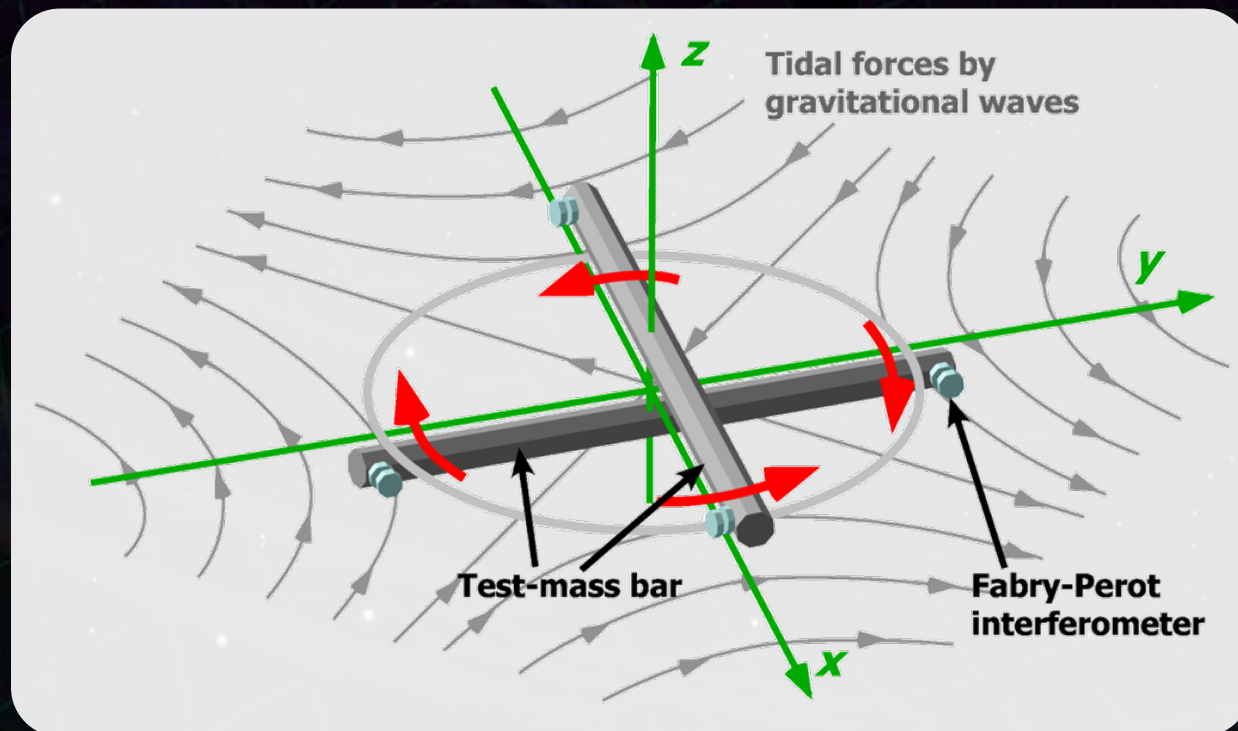
# 振じれ型アンテナ

## 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

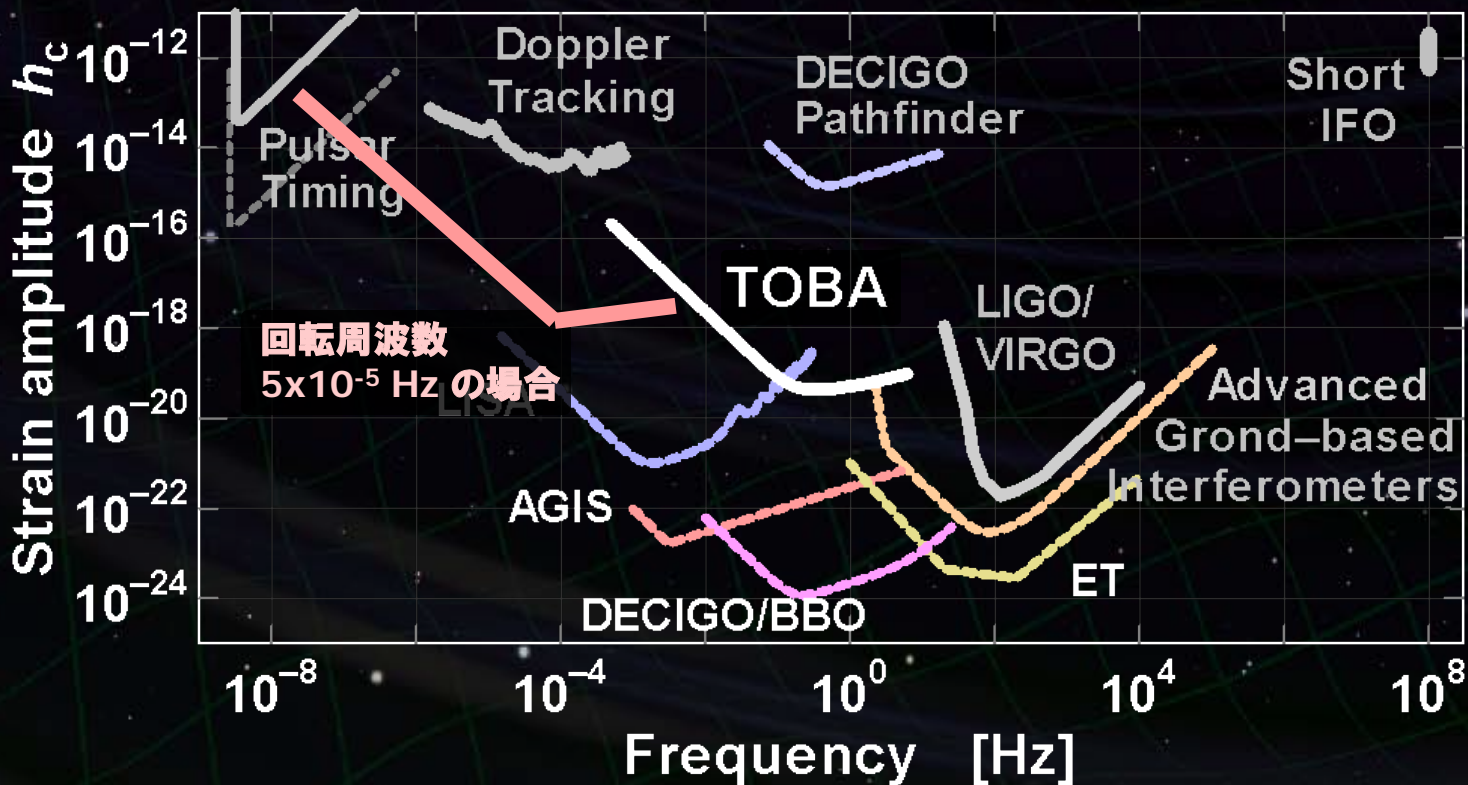
現実的なパラメータを仮定

試験質量 質量 7,600kg, 長さ 10m

レーザー光源 10W

低温動作 4K

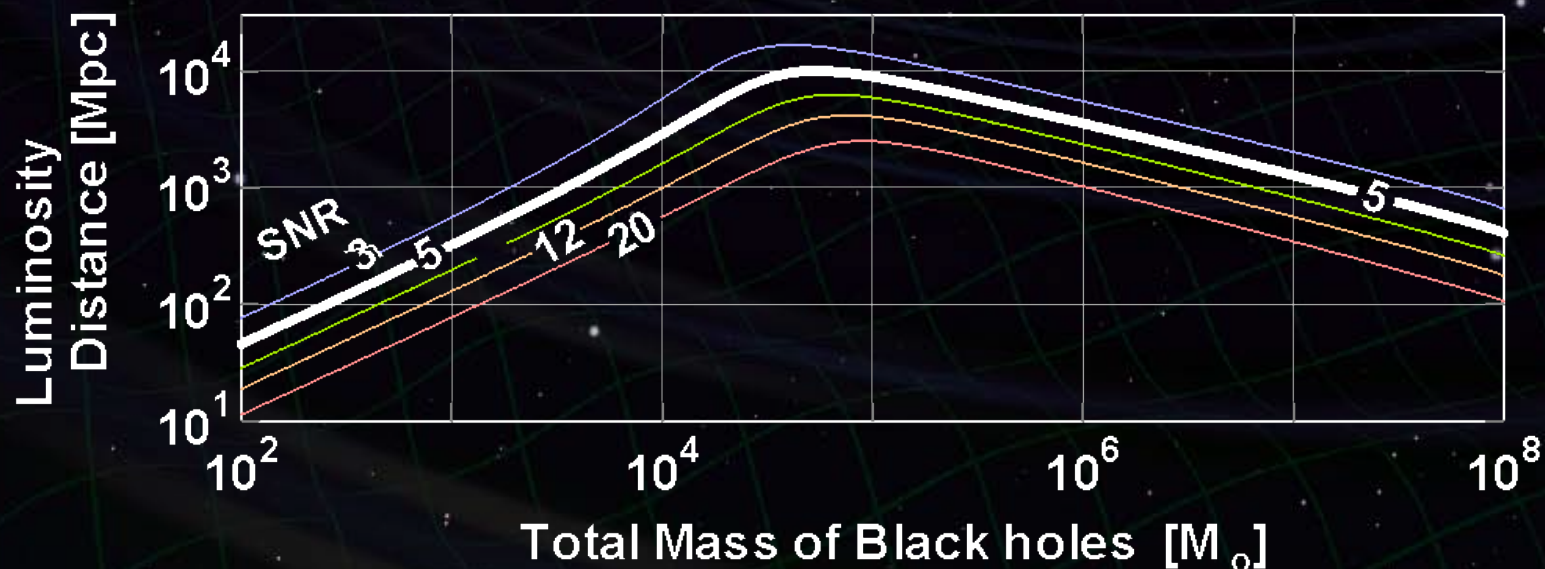
Bar length : 10m, Mass : 7600kg  
Laser source : 1064nm, 10W  
Cavity length : 1cm, Finesse : 100  
Bar Q-value :  $10^5$ , Temp: 4K  
Support Loss :  $10^{-10}$



# 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

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

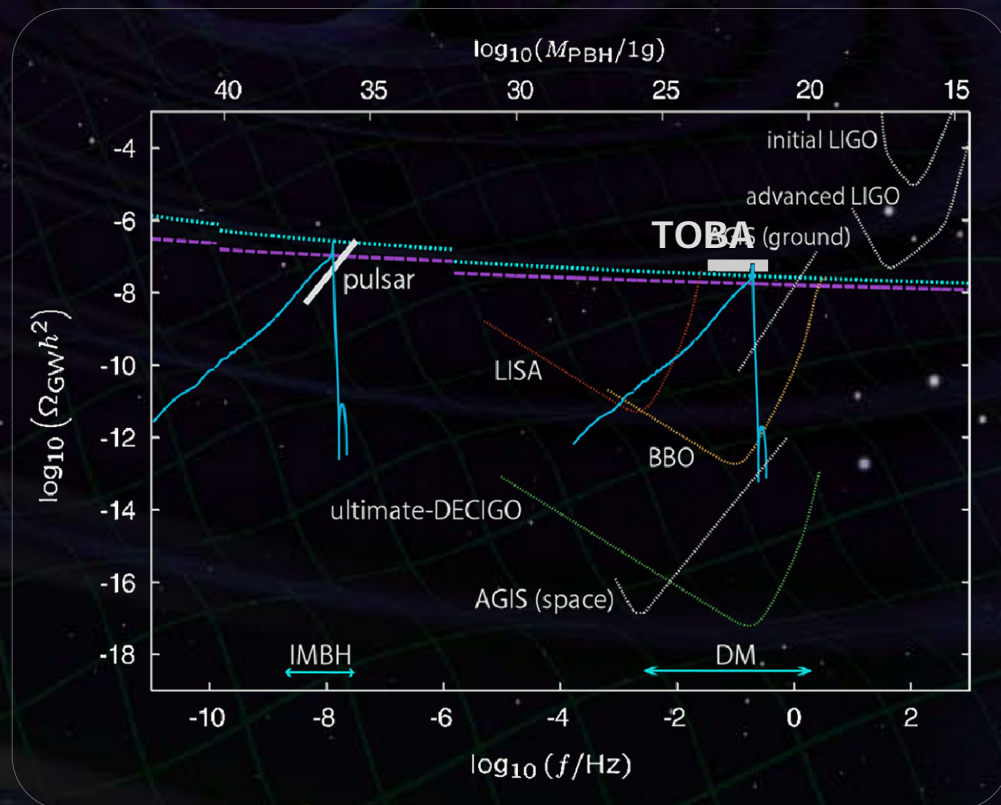
(1年間の観測)



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-)



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

試験マス  
変動検出  
位置・姿勢

### 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

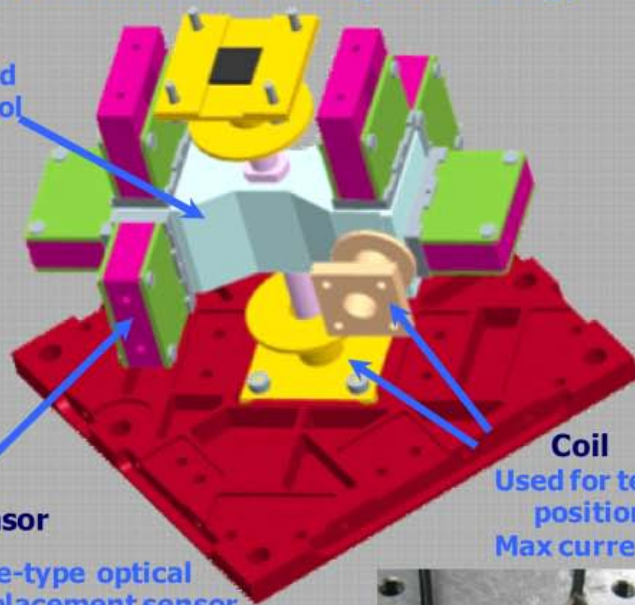
# SWIM搭載モジュール

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

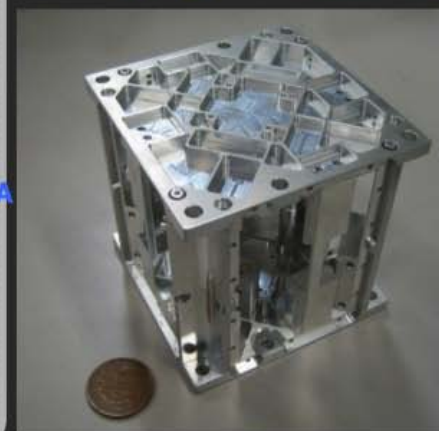


## Photo sensor

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



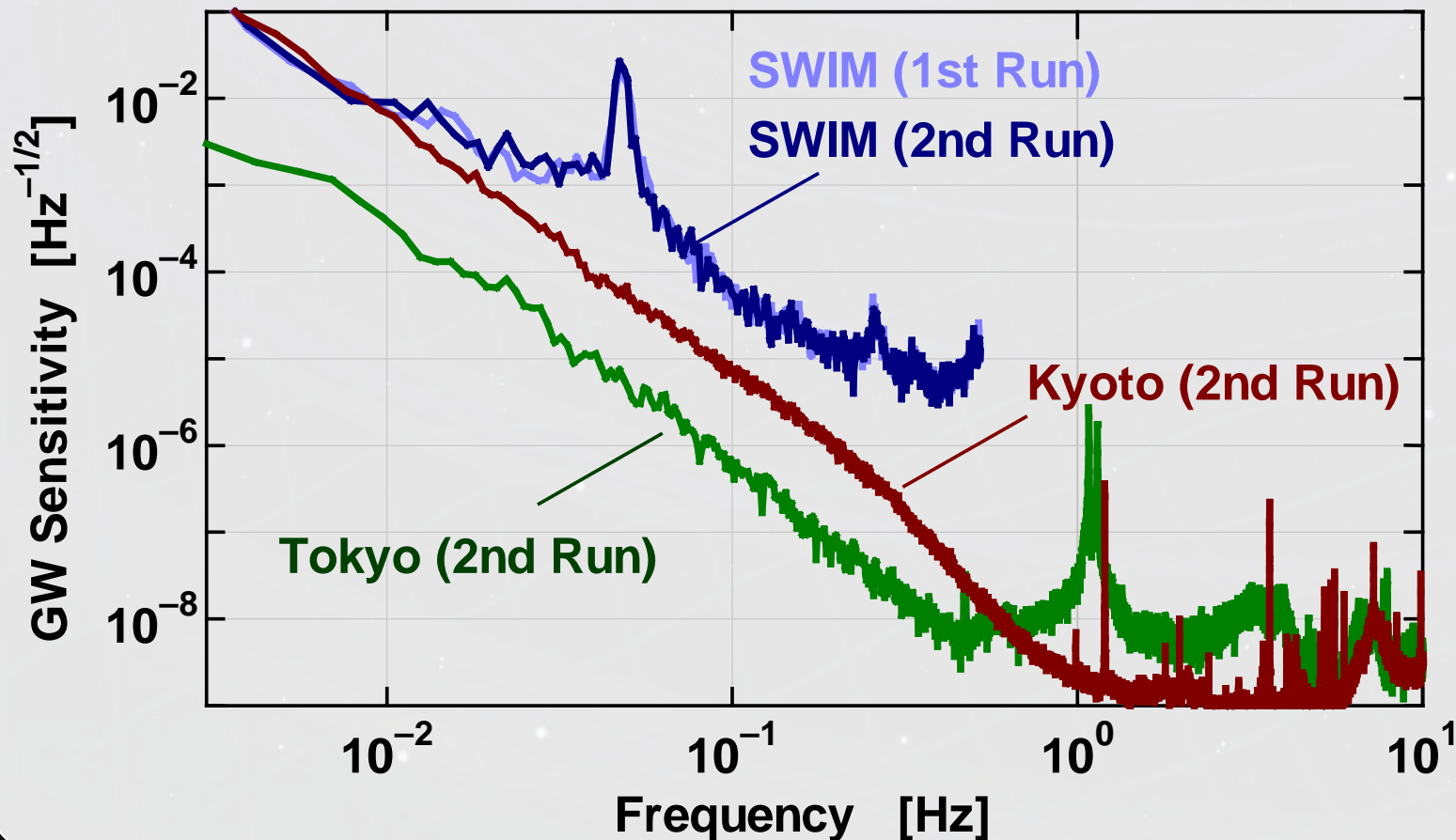
Coil  
Used for test-mass position control  
Max current ~100mA



# 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

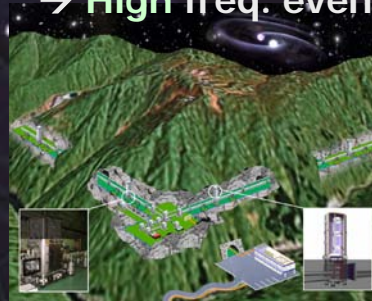


# ここまでのまとめ

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



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



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



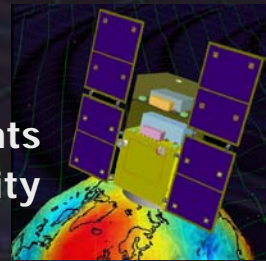
**TOBA (2005~)**  
Novel Detector configuration



振じれ振子

低周波  
数雑音

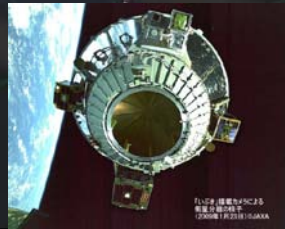
**DPF (2015~)**  
Small Satellite  
Galactic events  
Earth's gravity



**Pre-DECIGO (2021~)**

回転TOBA

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



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



### 3. 微小距離重力

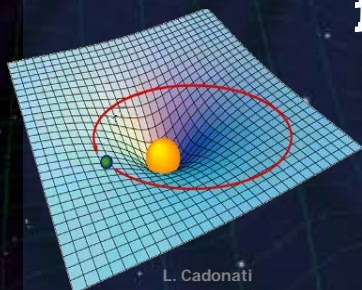
⇒ 重力の逆二乗則  
振じれ振子実験  
原子分光実験



# 重力と重力波

## 一般相対性理論

重力を時空の性質と解釈



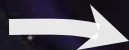
アインシュタイン方程式

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

時空の歪み

質量  
(エネルギー・運動量)

変動成分



## 重力波

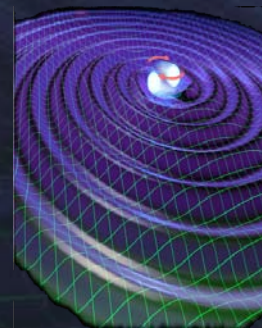
重力波天文学

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



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

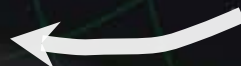
量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧

熱雑音, 地面振動

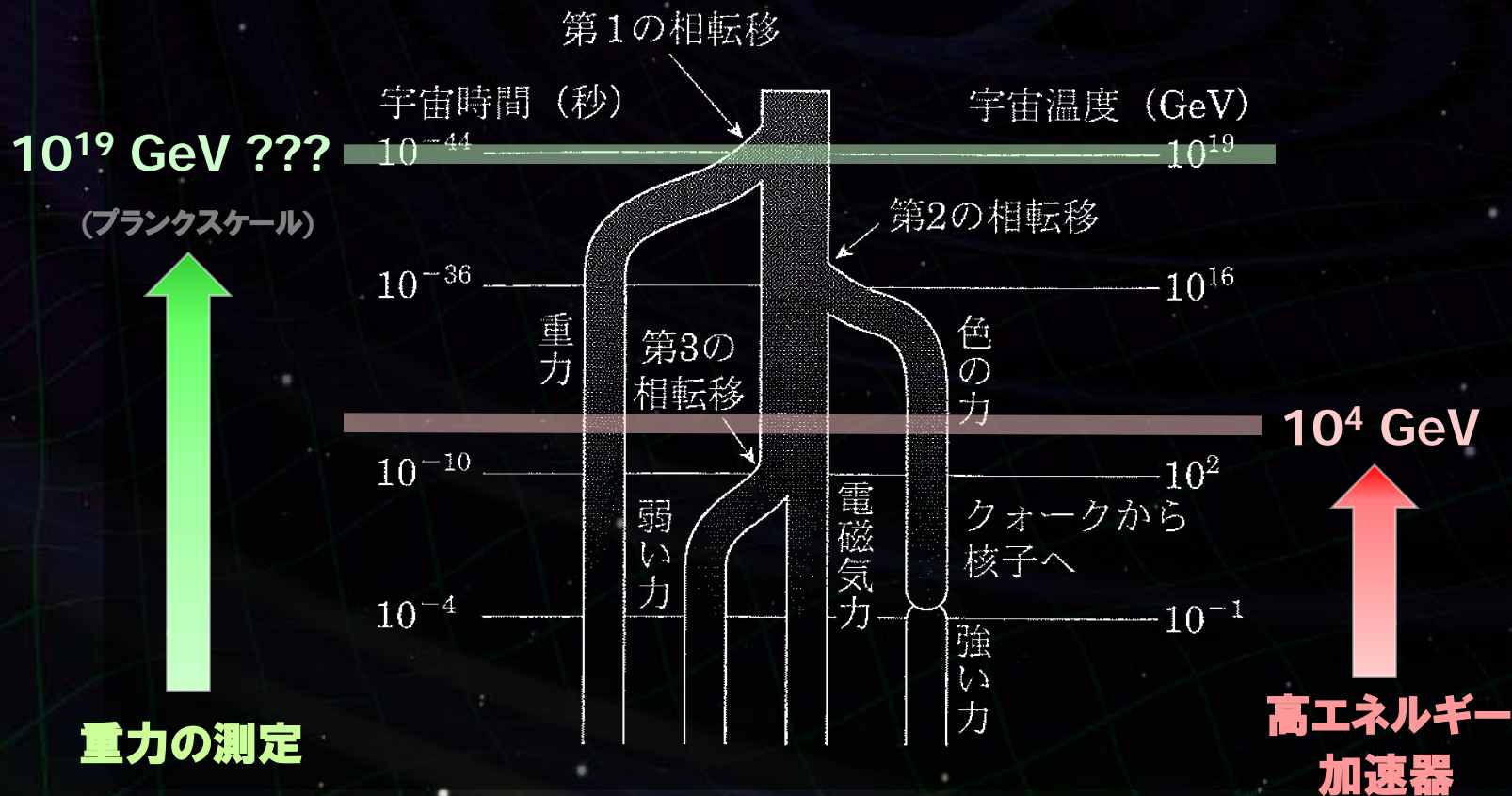
信号処理

測定



# 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

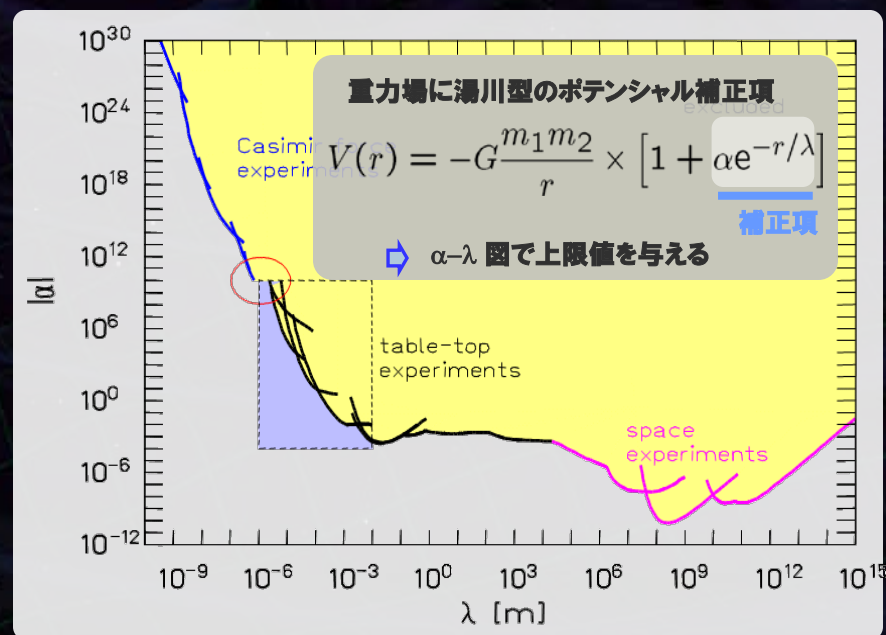
(Cosmological Constant Problem)

ダークエネルギーの大きさが、真空場揺らぎのエネルギーより極端に小さい

⇒ 余剰次元の存在で説明できる可能性

→ 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





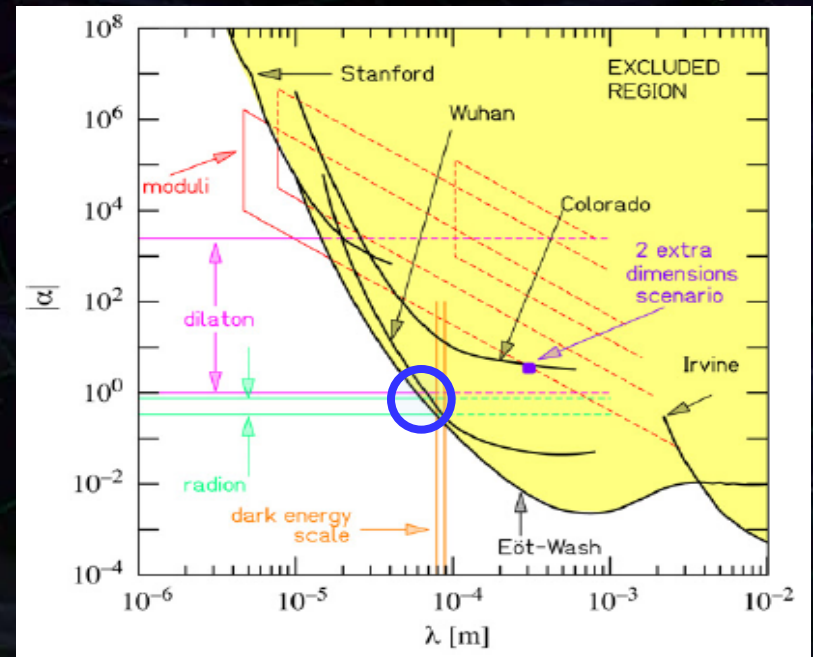
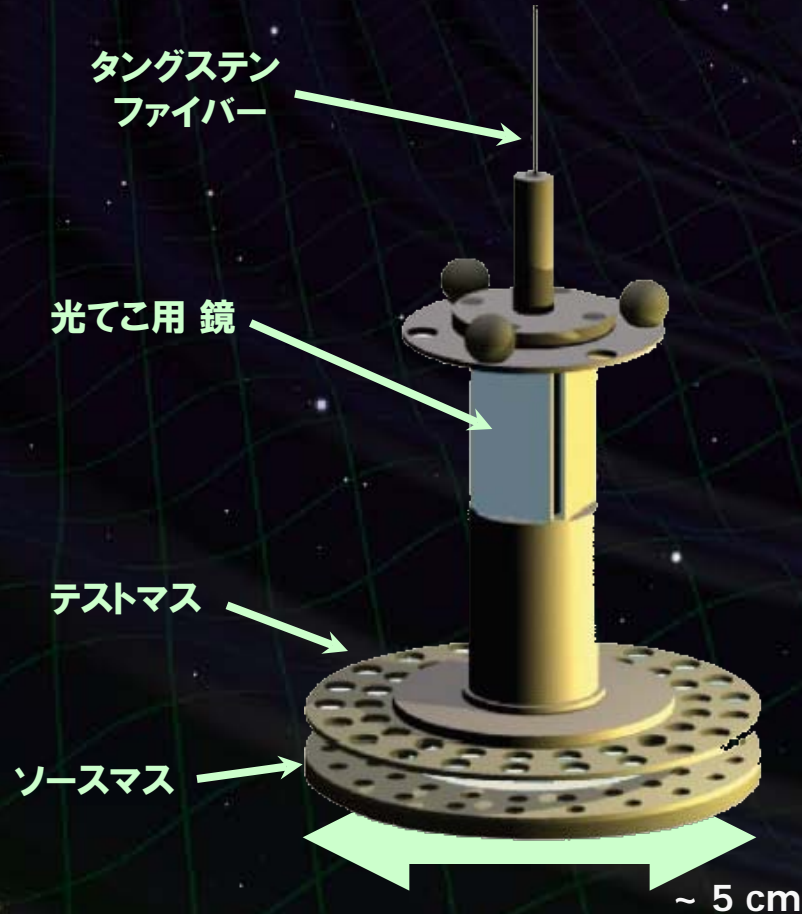
# 近年の検証実験

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

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

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



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)

### 3. 微小距離重力

重力の逆二乗則

⇒ 振じれ振り子実験

原子分光実験



# 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

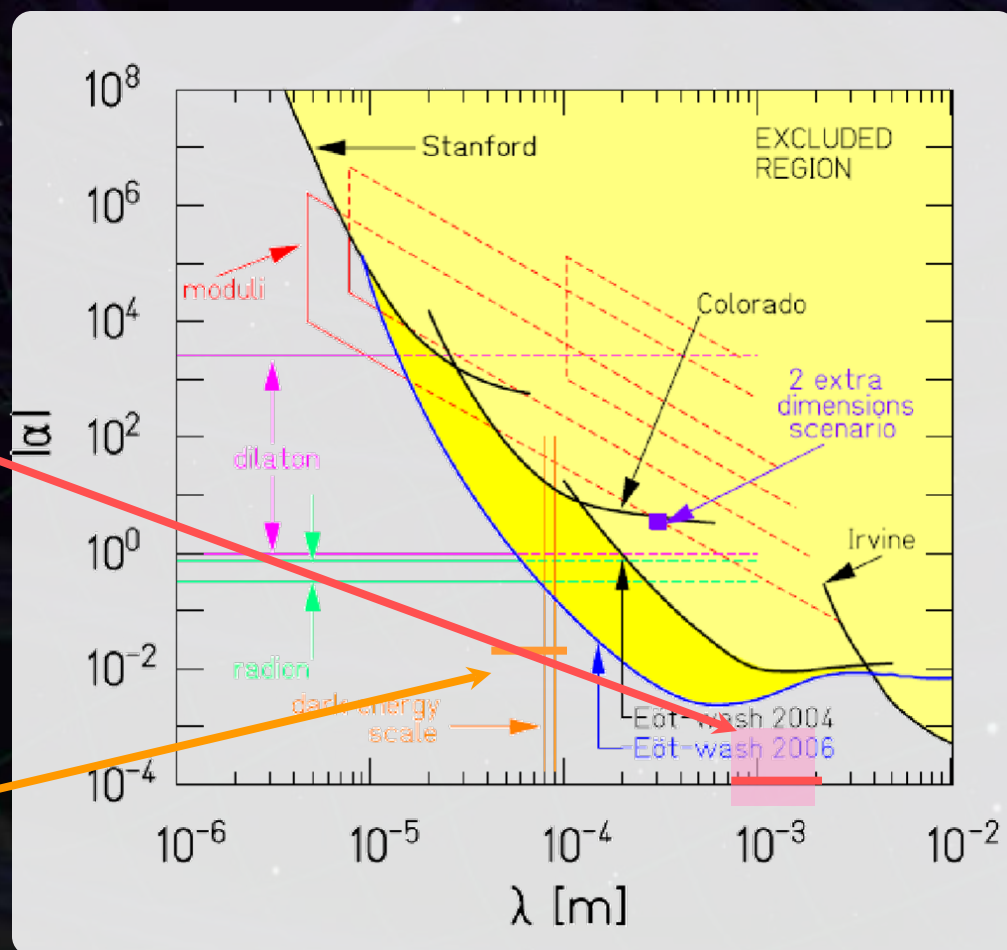
$$|\alpha| < 10^{-4}, \lambda = 1-3 \text{ mm}$$

(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

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



# 実験の概要

## 測定の概要

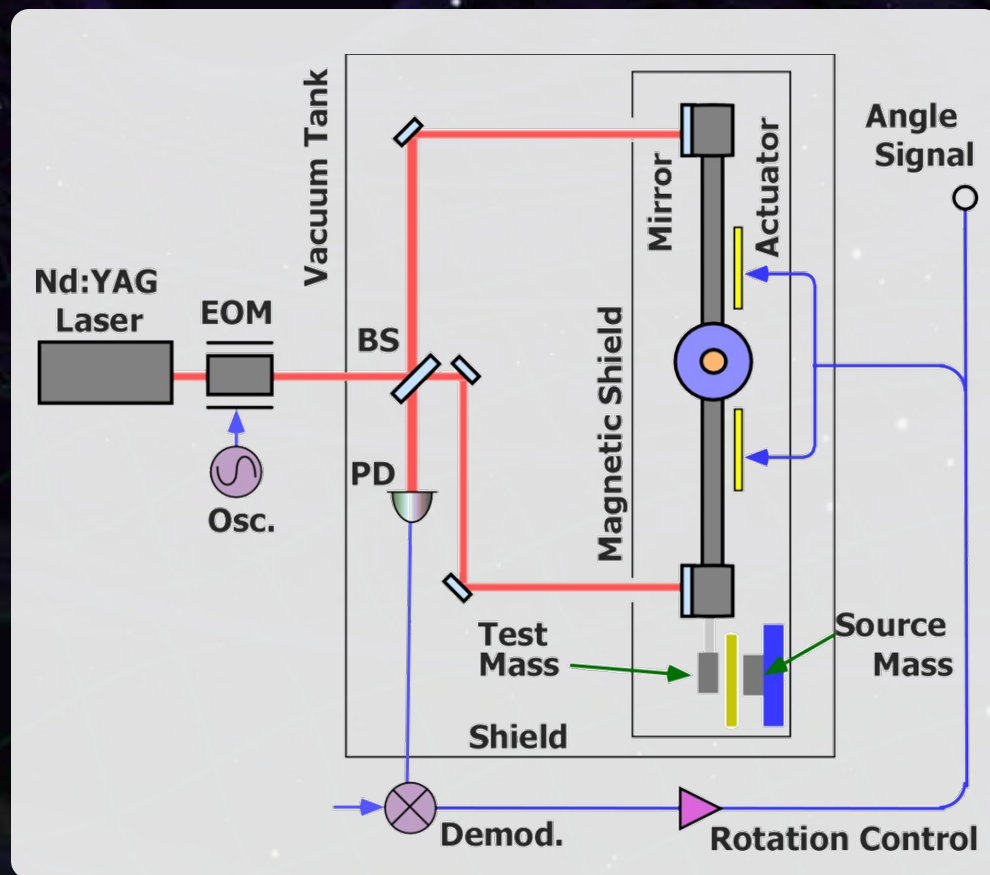
長さ 20cm程度の棒状ねじれ秤  
先端にテストマス  
近くにソースマスを設置

⇒ 重力による角度変動を  
レーザー干渉計で測定

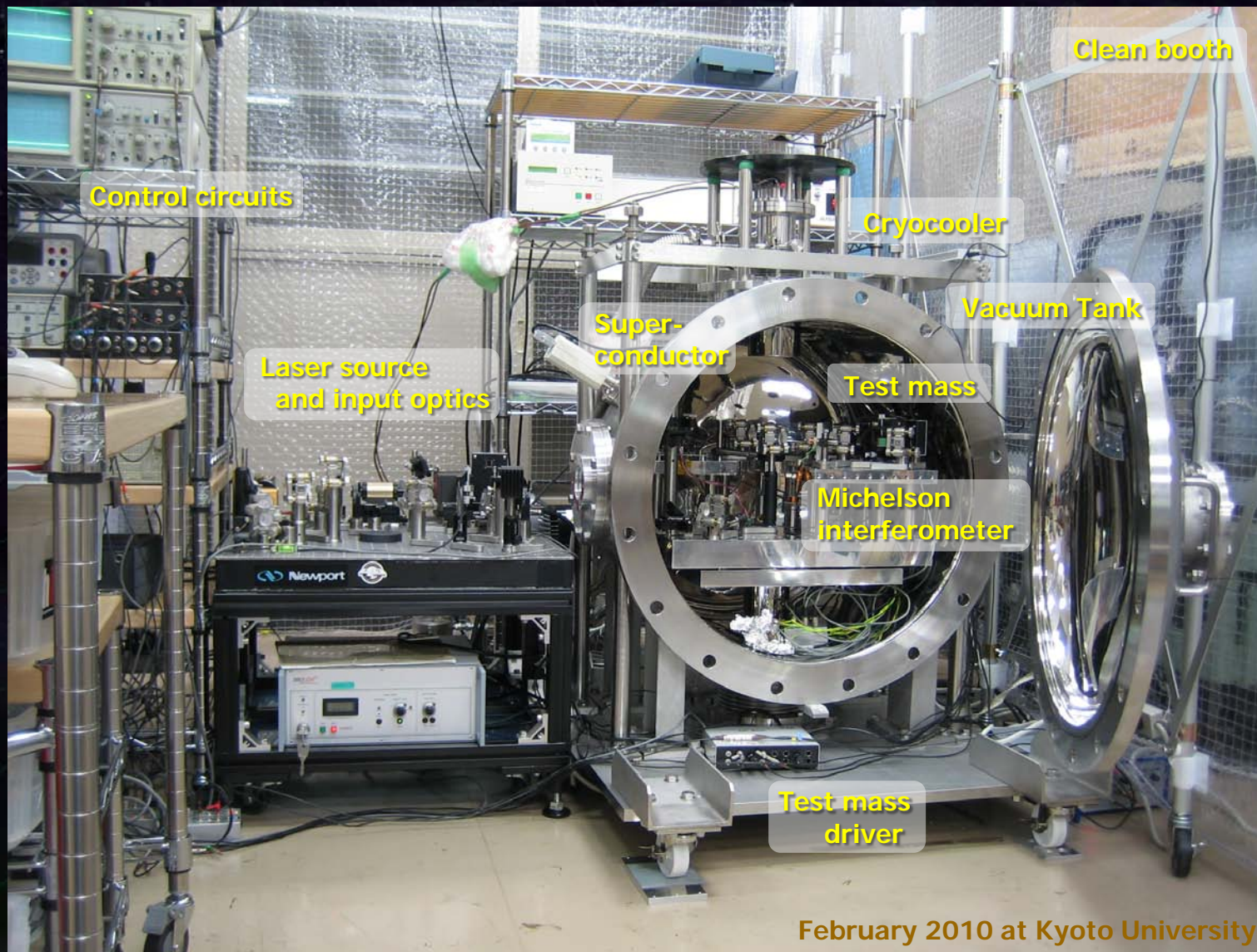
## 特徴

- (1) 超伝導体による非接触支持
- (2) レーザー干渉計による角度計測

⇒ 高感度化



# 実験装置



# ポテンシャル補正項に対する精度

## ポテンシャル補正項の定量的評価

初期目標 :  $|\alpha| < 10^{-4}$  ,  $\lambda = 1-3$  mm

距離  $r = \lambda$  で測定するときの力

$$F = F_{\text{Newton}} \times (1 + 2\alpha)$$

⇒  $|\alpha|$  程度の相対精度が必要

ニュートン重力の大きさ

タングステン板 2枚に働く力

10x10x1mm, 間隔 1mm

⇒  $2.5 \times 10^{-10}$  N

見積もられる精度

良い帯域での感度:  $5 \times 10^{-15}$  N/Hz<sup>1/2</sup>

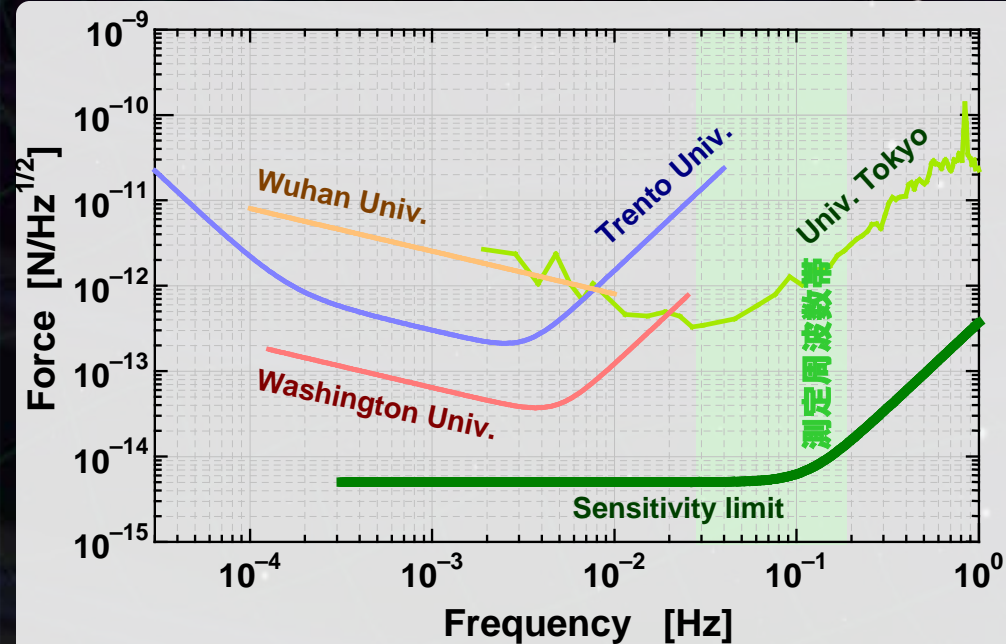
測定時間 :  $10^2$  sec

⇒  $5 \times 10^{-16}$  N

⇒  $|\alpha| \sim 1 \times 10^{-6}$  の精度に対応

感度には 2桁の余裕

→ 目標実現は十分可能



### 3. 微小距離重力

重力の逆二乗則

振じれ振り子実験

⇒ 原子分光実験





# 分子スケールでの重力法則検証

Nesvizshevsky et. al,  
PRD 77 034020 (2008)

より短距離 ( $< 10^{-8}$  m)での  
重力法則の検証

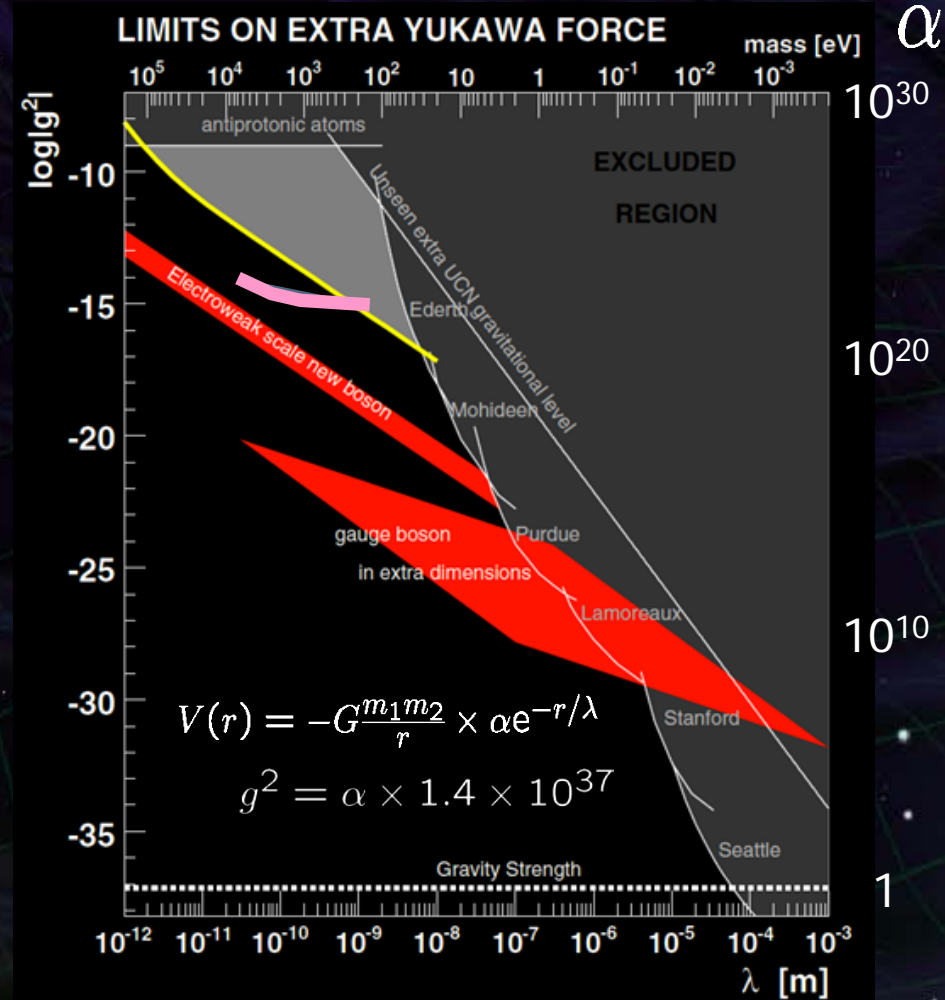
先行研究: 中性子散乱実験の解釈  
 $\alpha < 10^{23}$  ( $\lambda \sim 1$  nm)



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

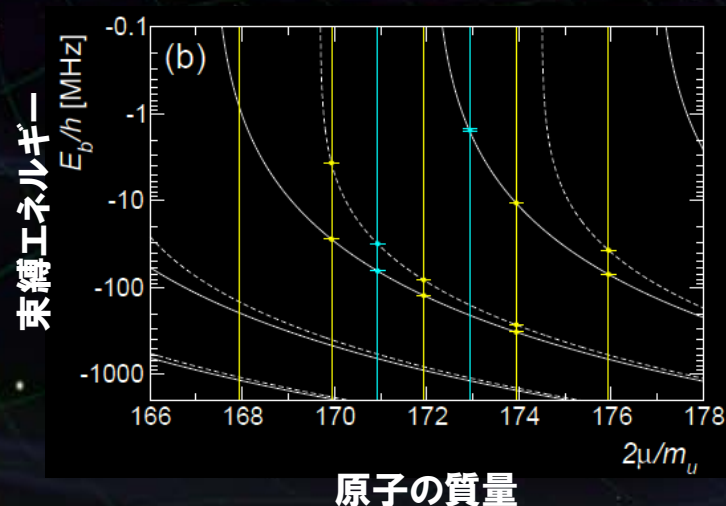
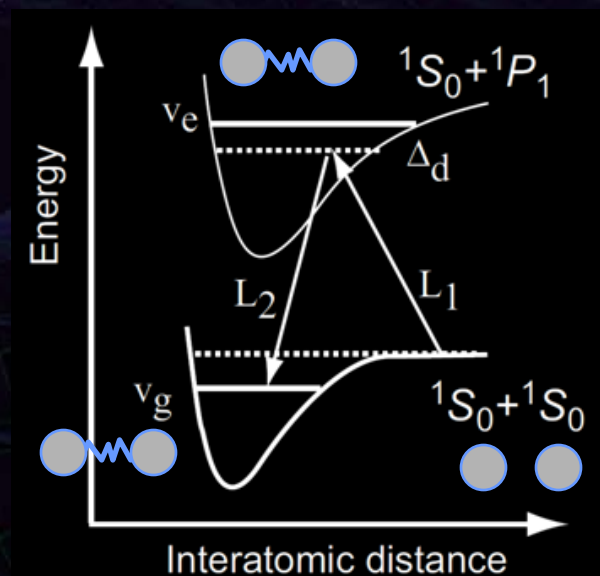
## Born-Oppenheimerポテンシャルでモデル化

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

- ⇨ 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.

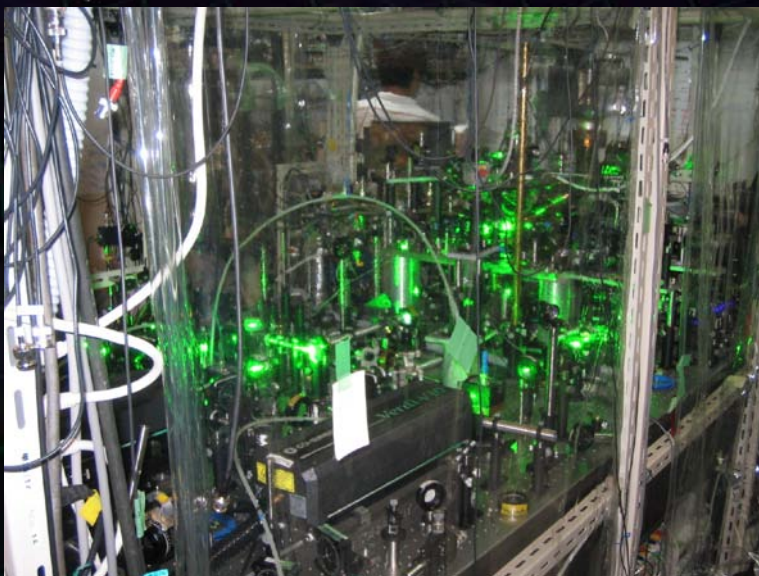


# 実験の現状

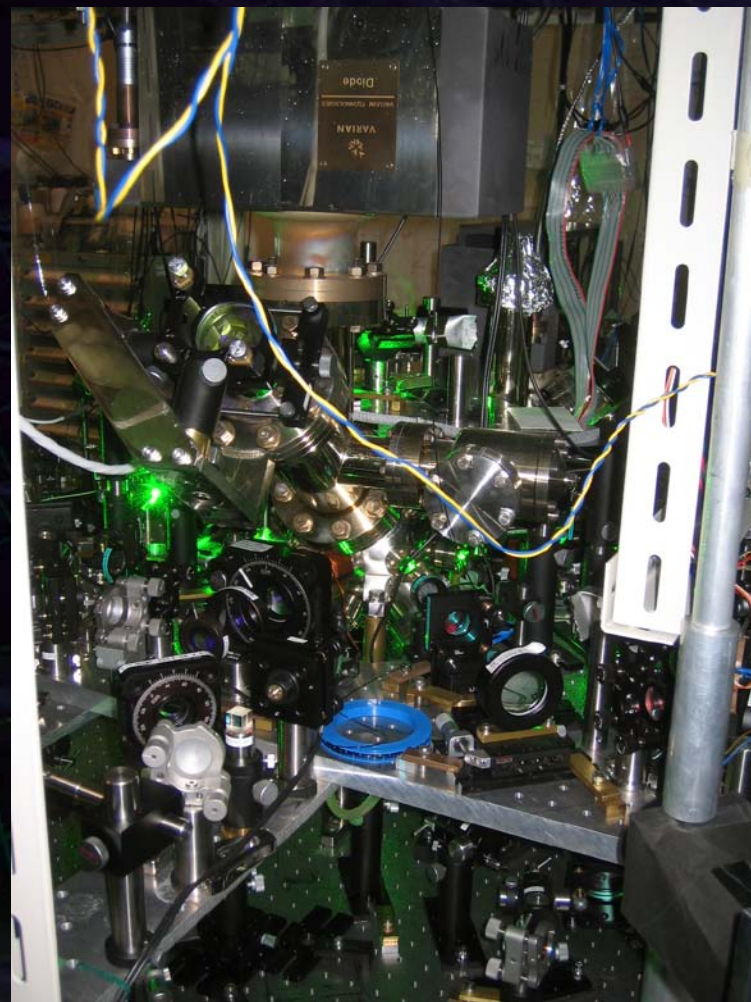
より精度の高い測定を目指し  
光格子での分光測定が進行中

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

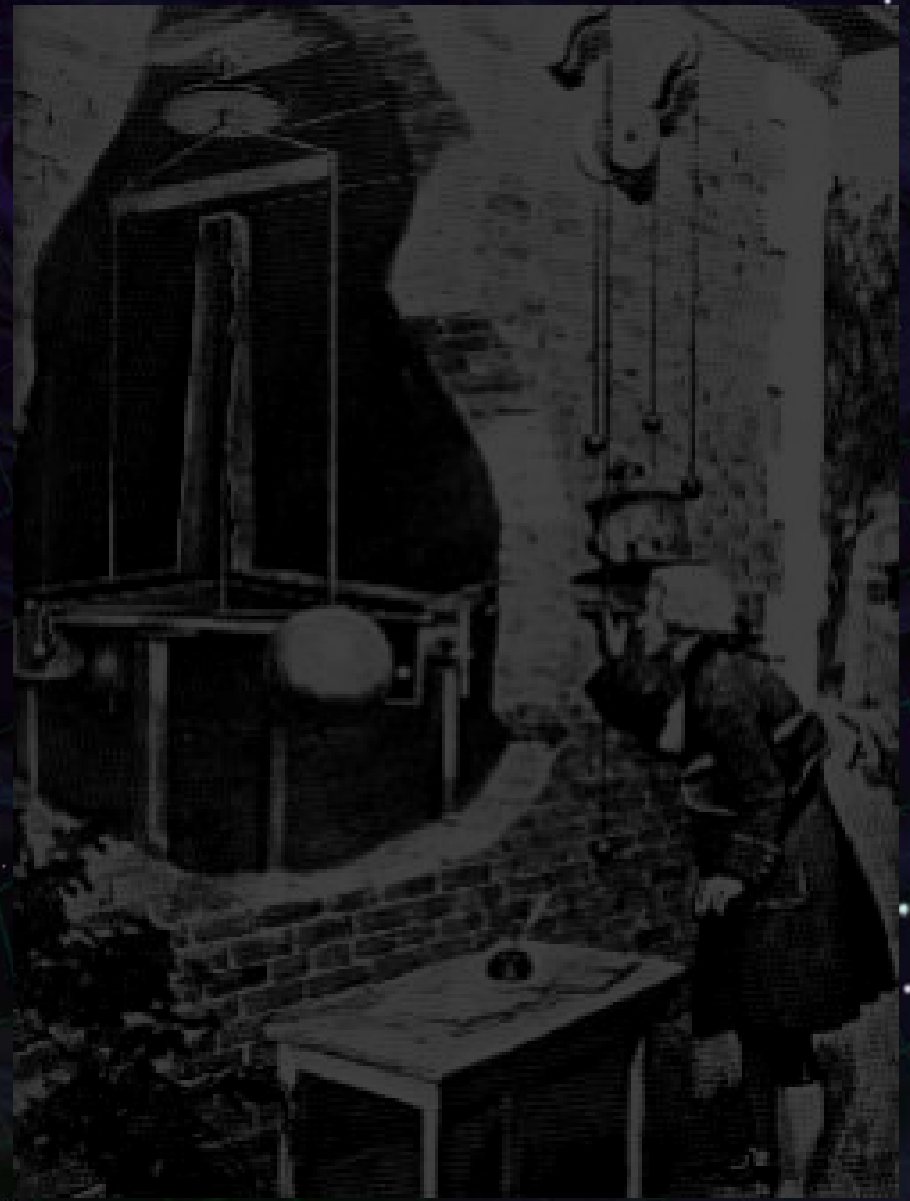


光トラップおよび  
2光子光会合測定装置



## 4. まとめ

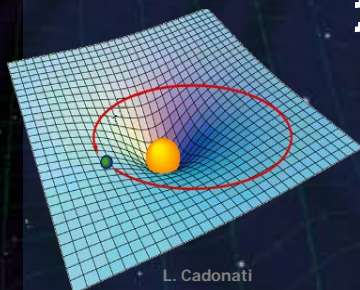
⇒ まとめ



# 重力と重力波

## 一般相対性理論

重力を時空の性質と解釈



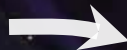
アインシュタイン方程式

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

時空の歪み

質量  
(エネルギー・運動量)

変動成分



## 重力波

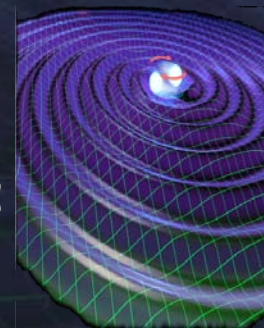
重力波天文学

宇宙を探る新しい目

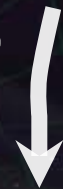
激しい天体現象の中心部

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



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

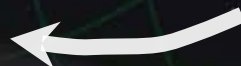
量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧

熱雑音, 地面振動

信号処理

測定



# まとめ

## ・重力波で宇宙を探る

- LCGTの建設が開始された。
  - 2017年に本格観測開始を目指す。
- DECIGO計画が進行中
  - SWIMによる宇宙実証と観測。
  - JAXA・小型科学衛星シリーズ
    - 3号機としてDPFの実現を目指す。
- TOBA: 新しいアイデア. 新たな展開の可能性.

## ・重力で時空を探る

- 振じれ振子による重力法則検証実験。
  - 最高精度の更新を目指す。
  - 新しい物理が見える可能性??
- 原子・分子の精密分光による重力法則検証実験。
  - 分野間融合による新しいアイデア。

終

