

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。

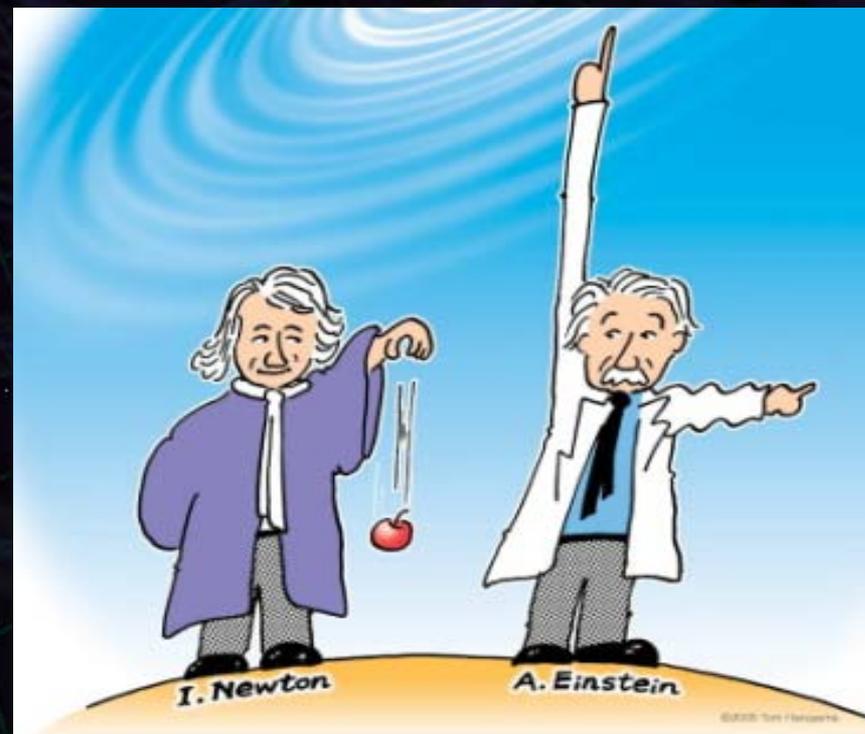
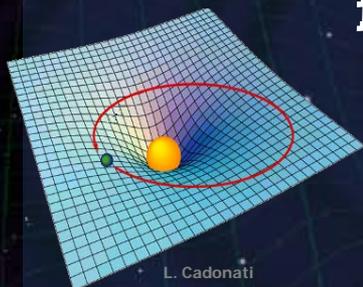


イラスト Tom Haruyama

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

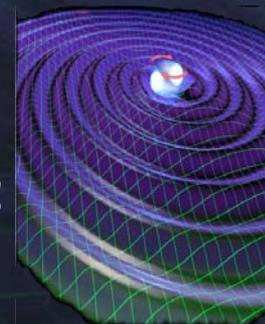
重力波天文学

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

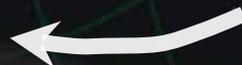
量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧

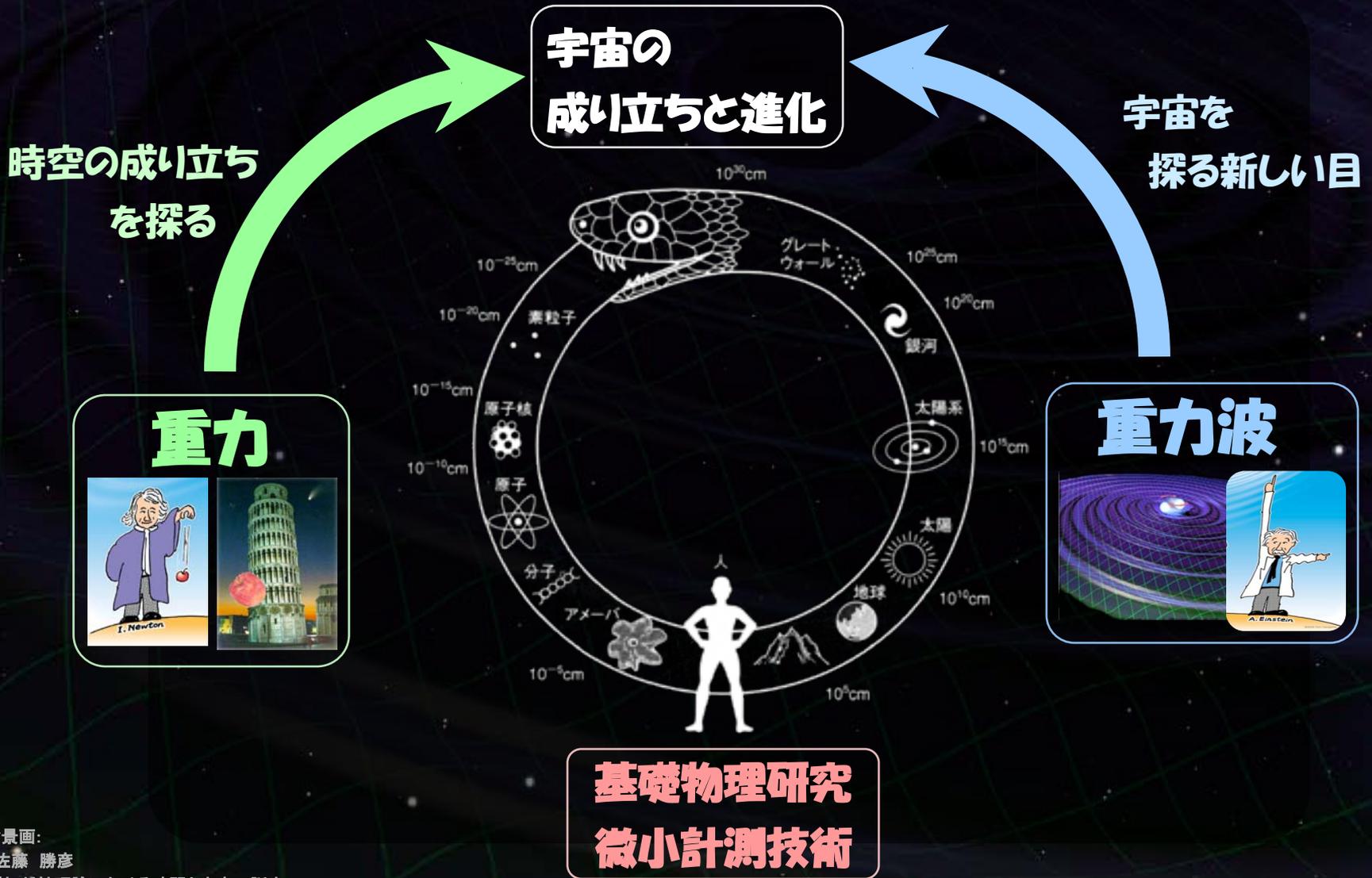
熱雑音, 地面振動

信号処理

測定



重力・重力波物理学



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

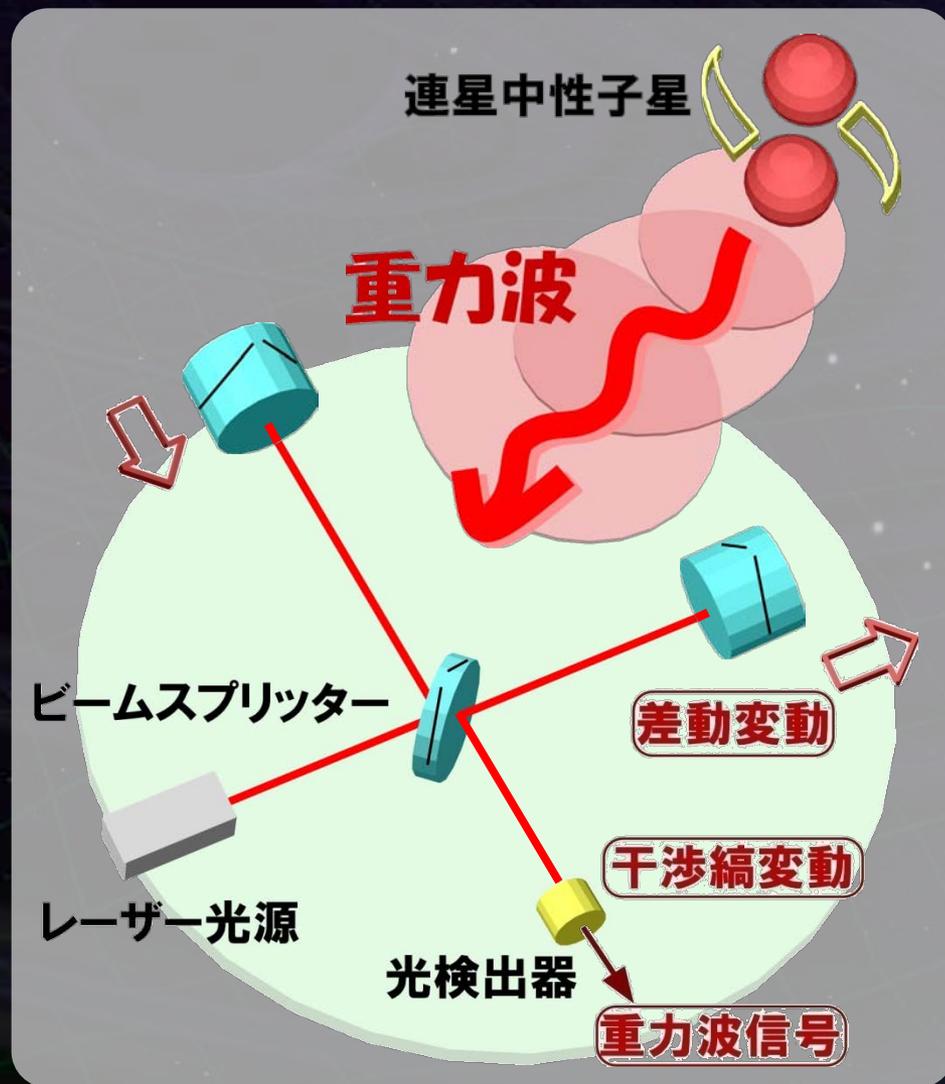
レーザー干渉計型重力波検出器

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)



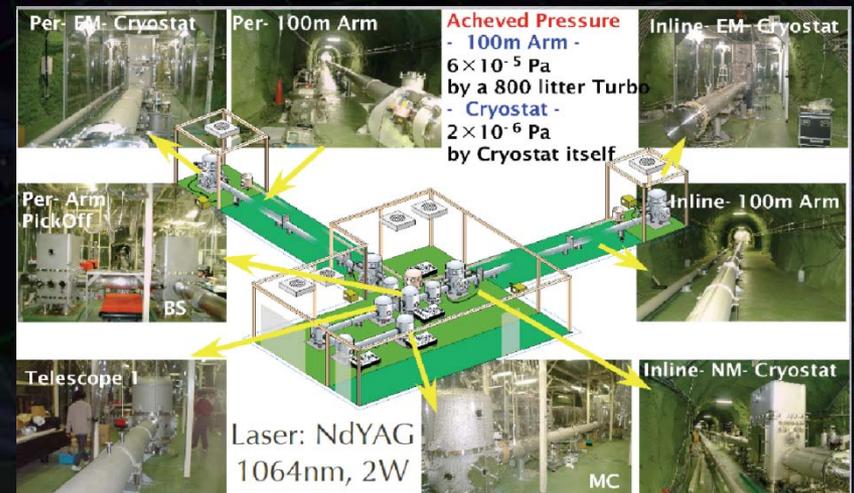
CLIO (2002~)

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

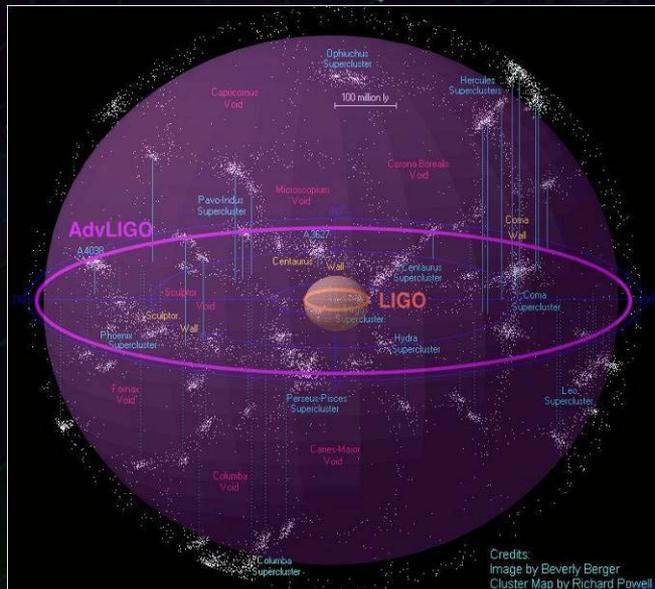
現在の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

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

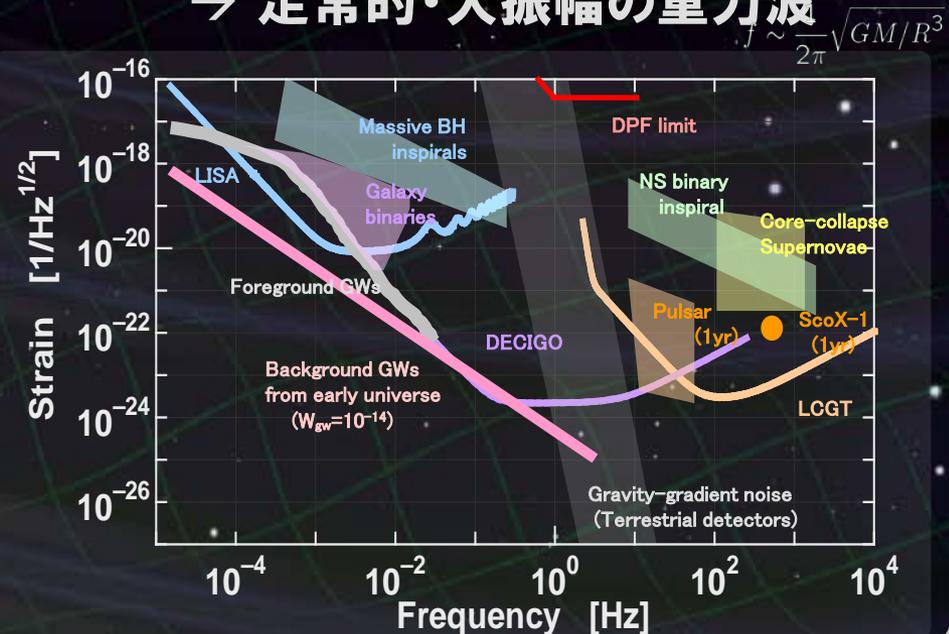
高感度化

→ より多くの銀河をカバーする



観測帯域を広げる

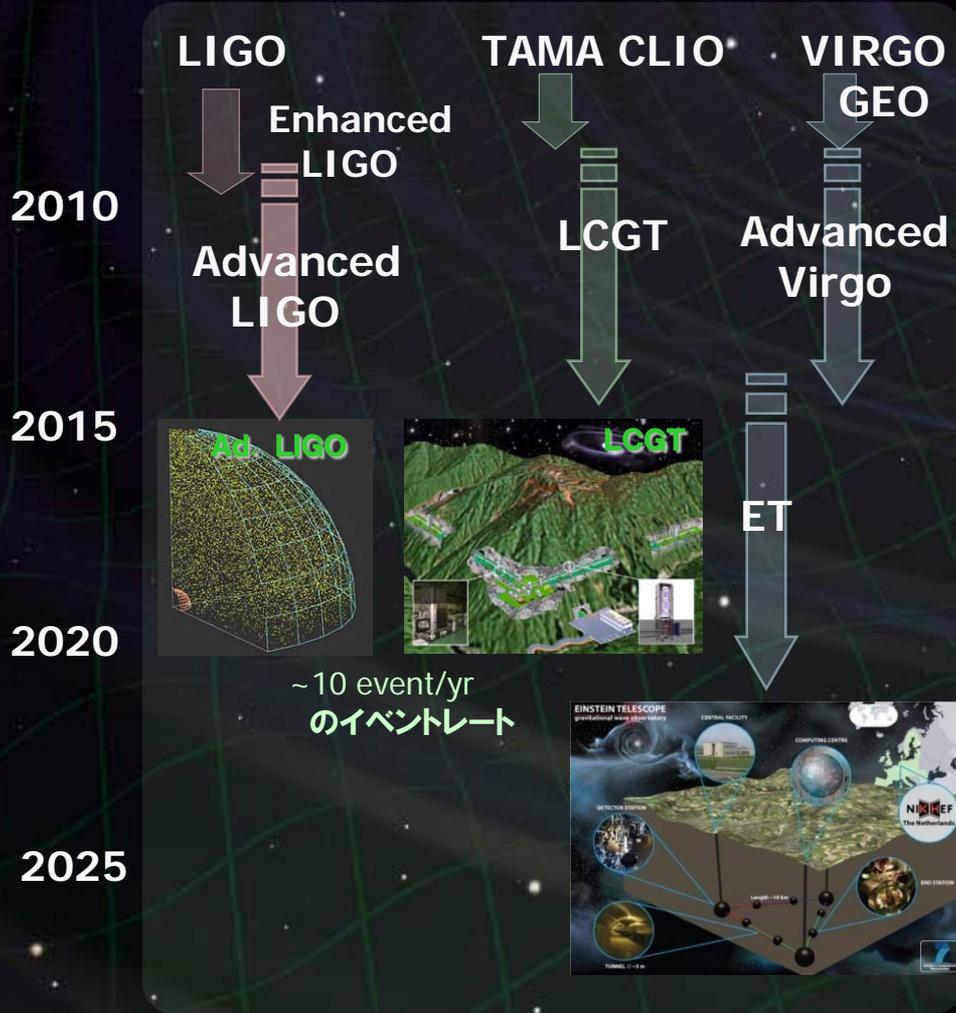
→ 定常的・大振幅の重力波



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



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%

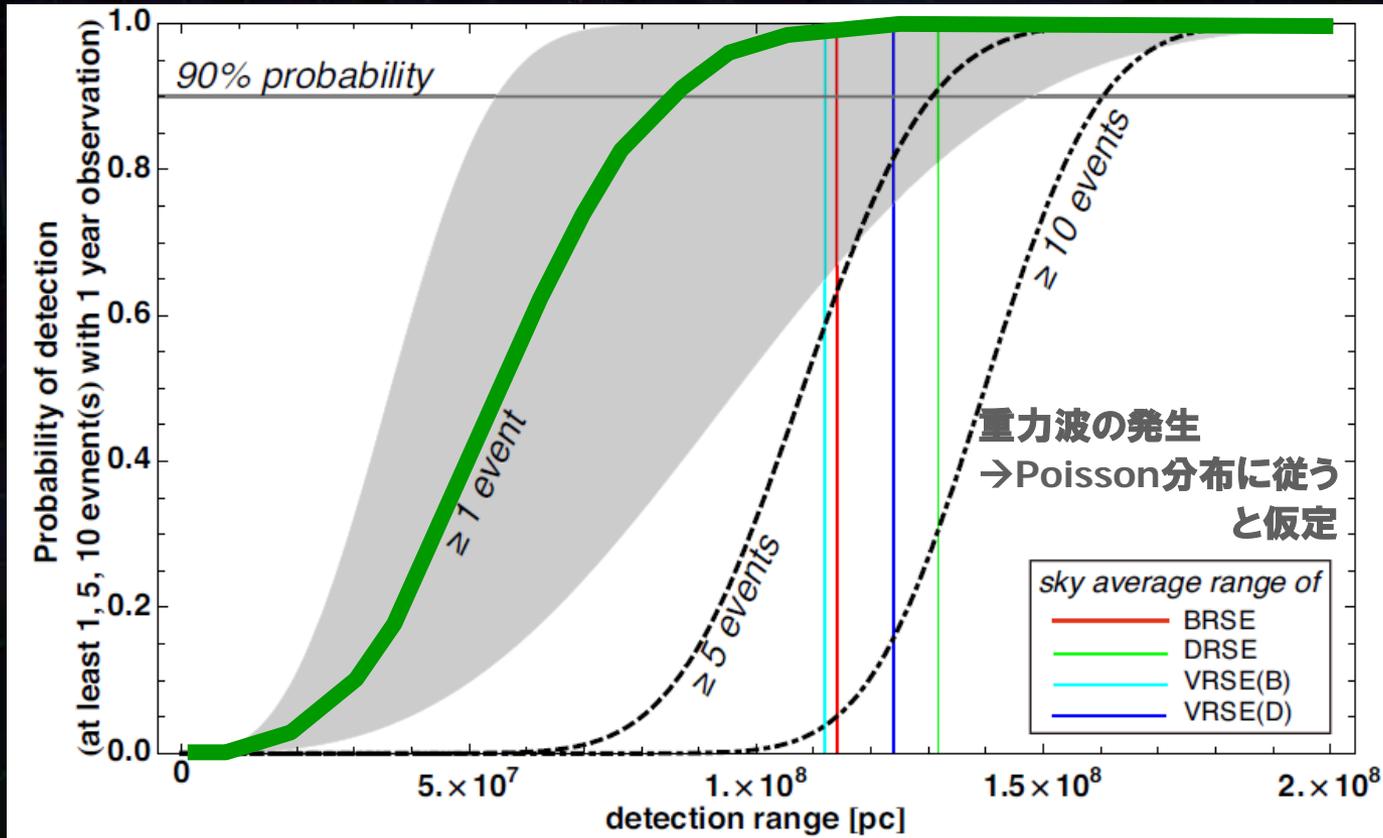


Figure
N.Kanda

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

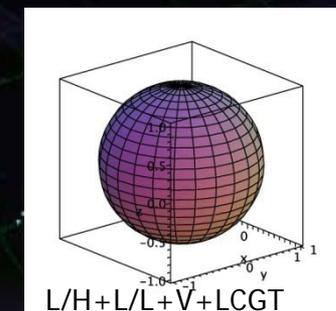
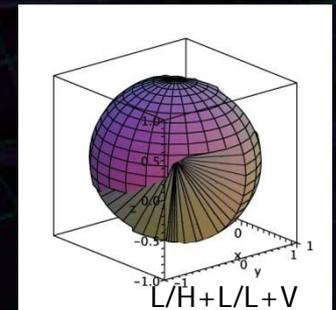
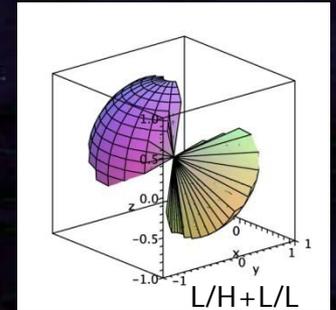
実際上の意義

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)

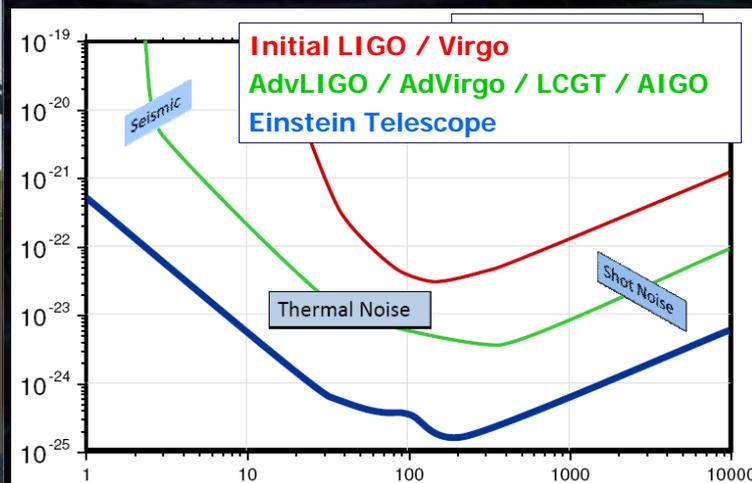
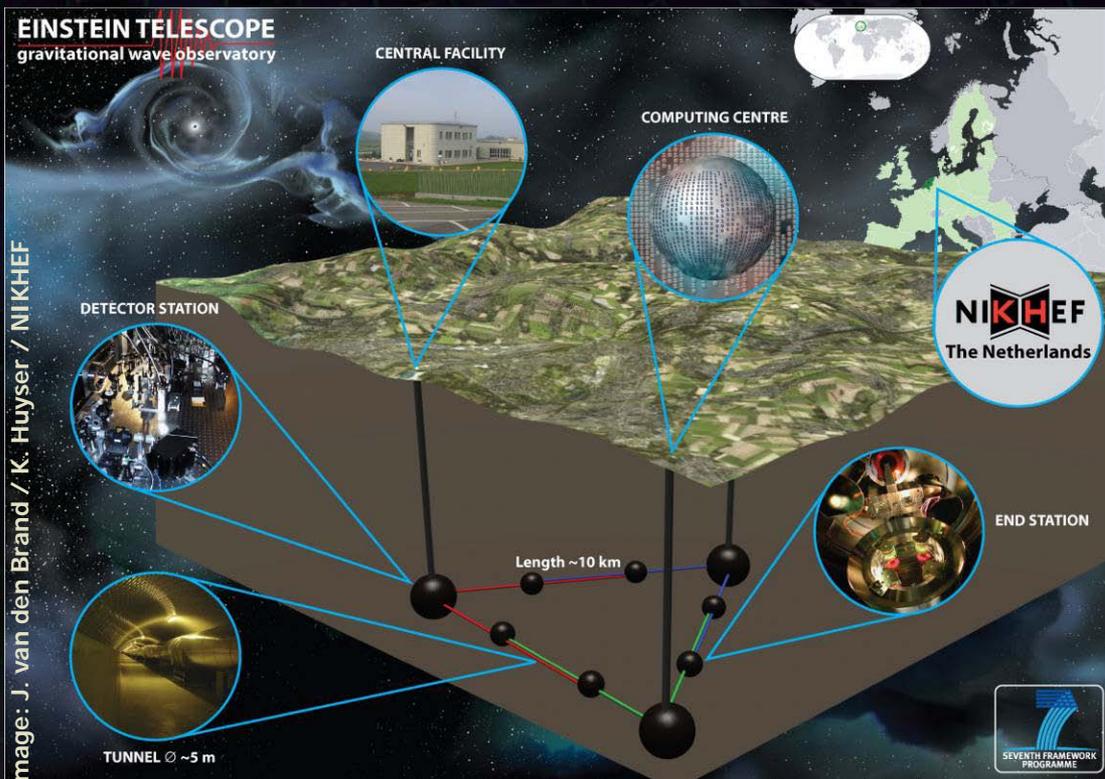
ヨーロッパの計画

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



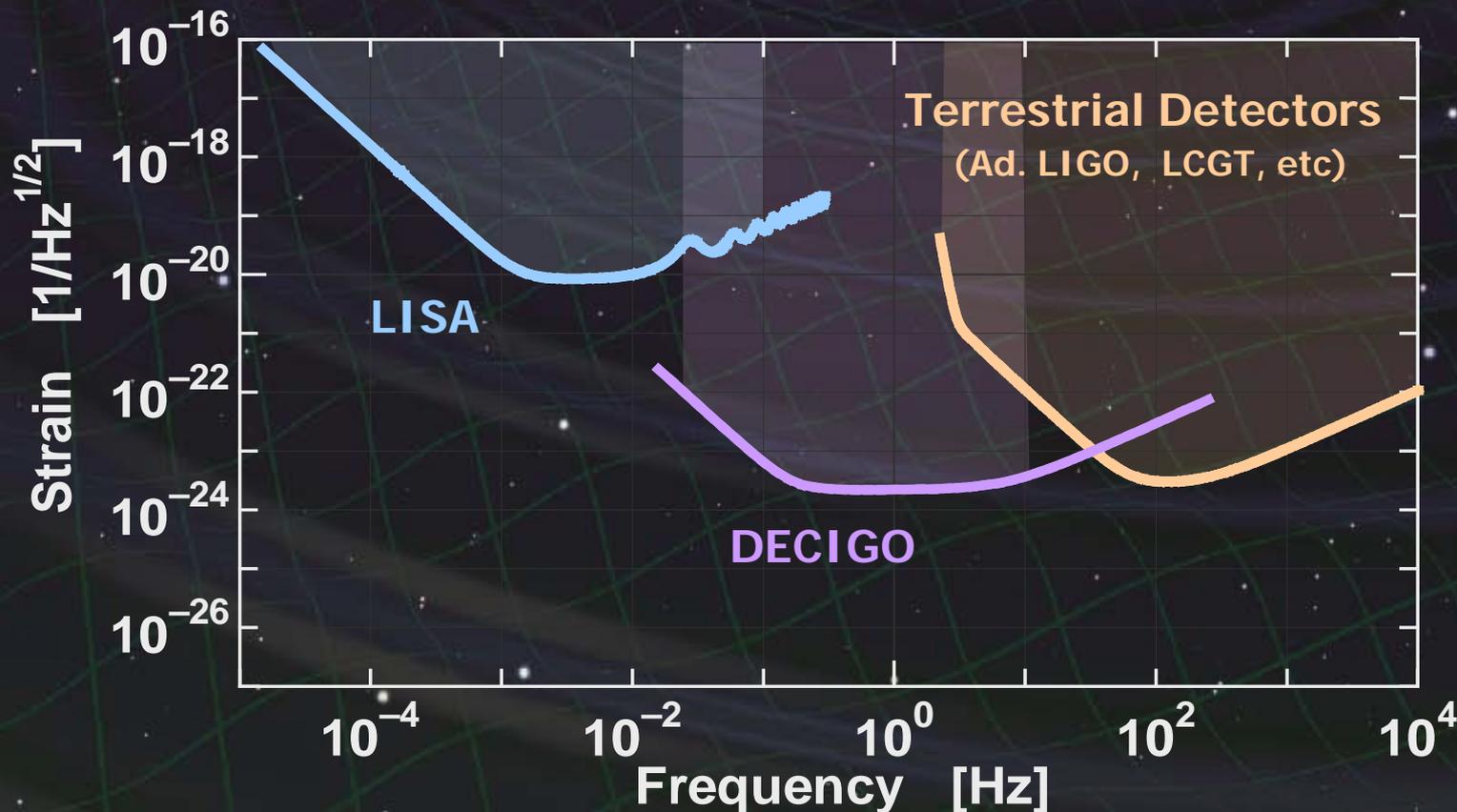
DECIGO

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

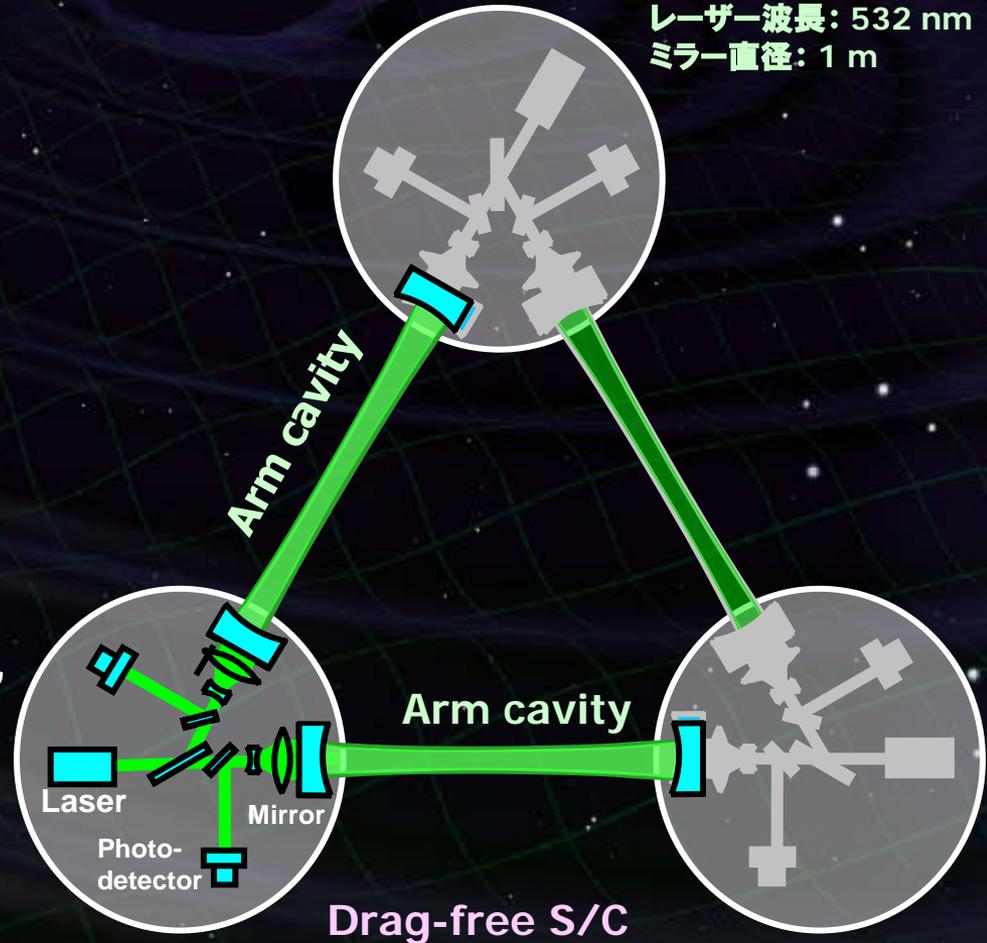
太陽公転軌道

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

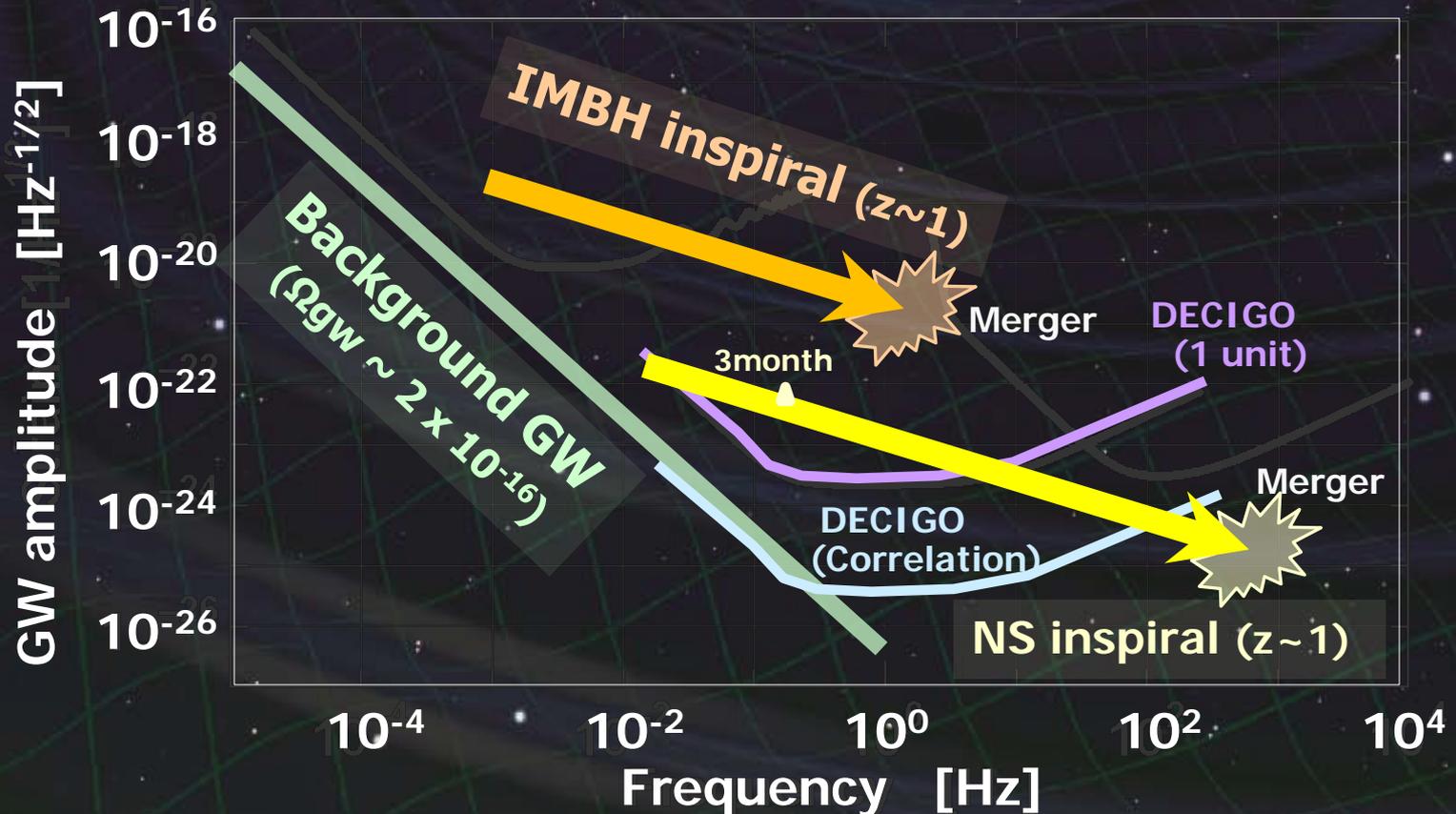


DECIGOの観測対象

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

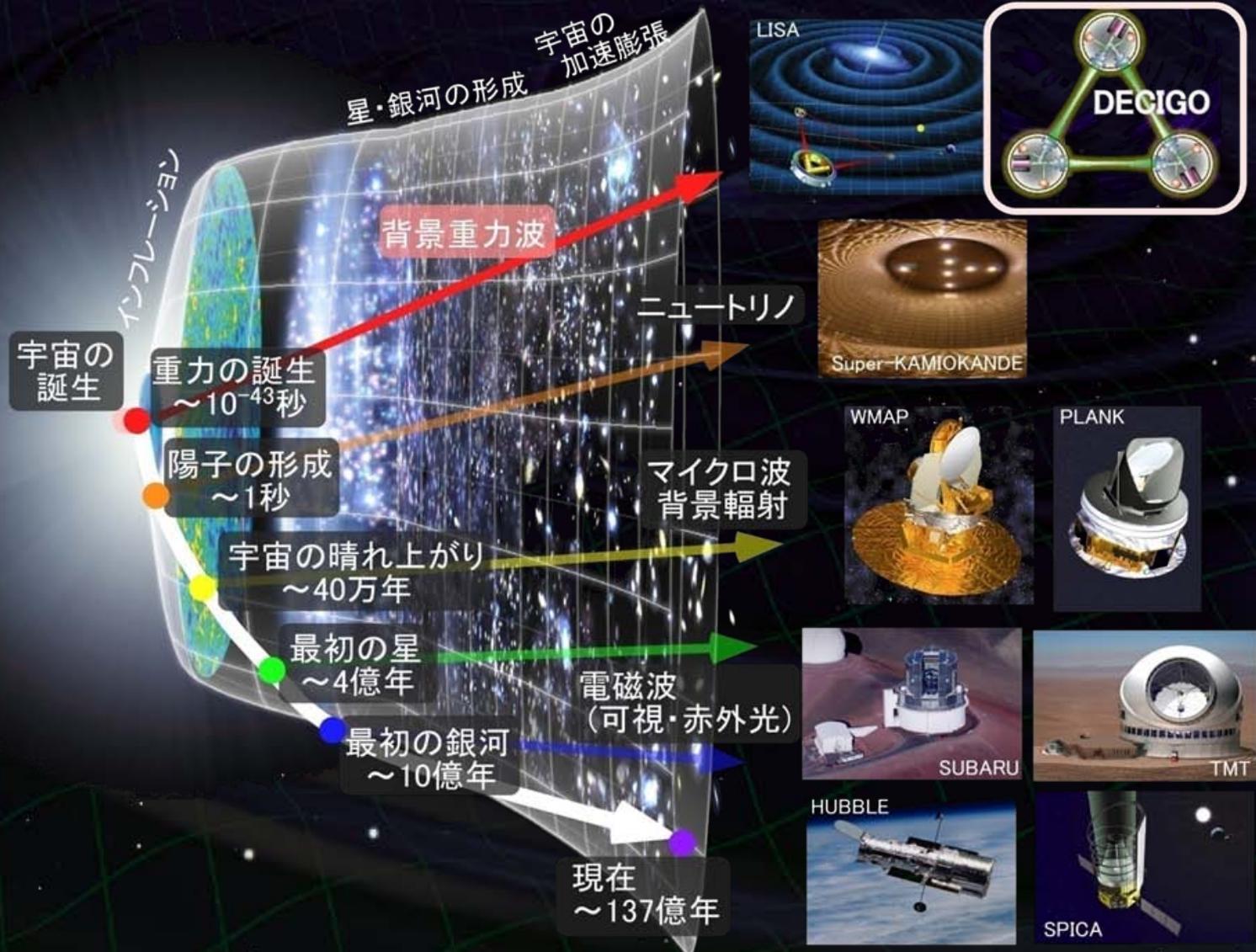
Angular resolution

~10arcmin (1 detector)

~10arcsec (3 detectors)

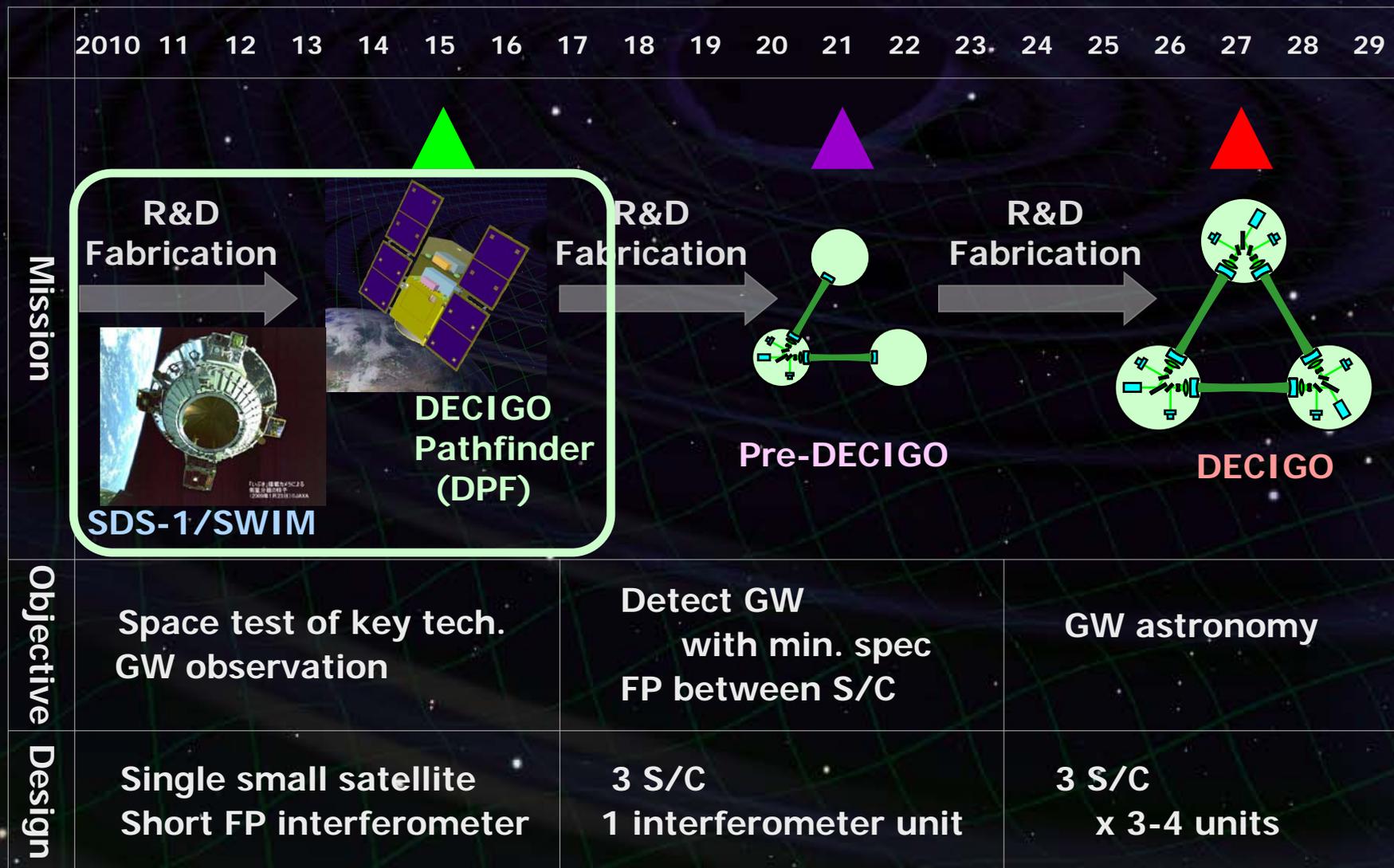
at $z=1$

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

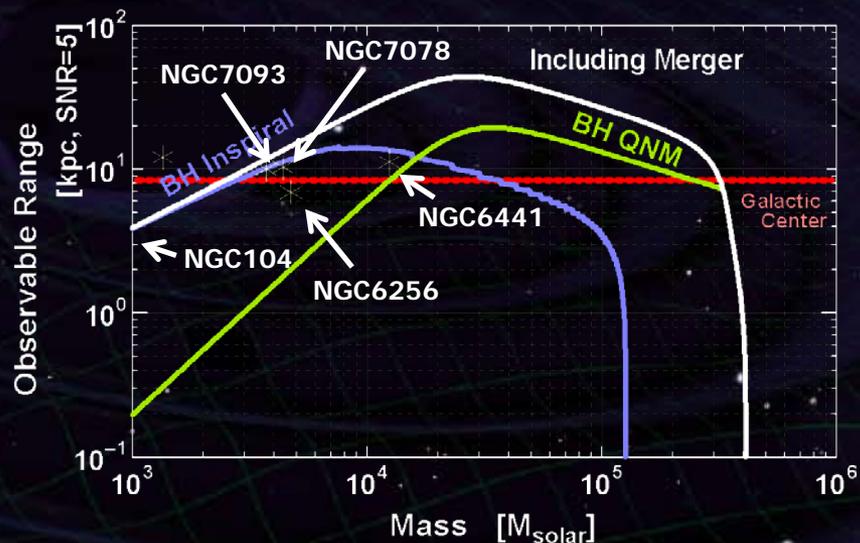
小型科学衛星3号機 (~2015年) を目指す

Earth Image: ESA

DPFの観測目標

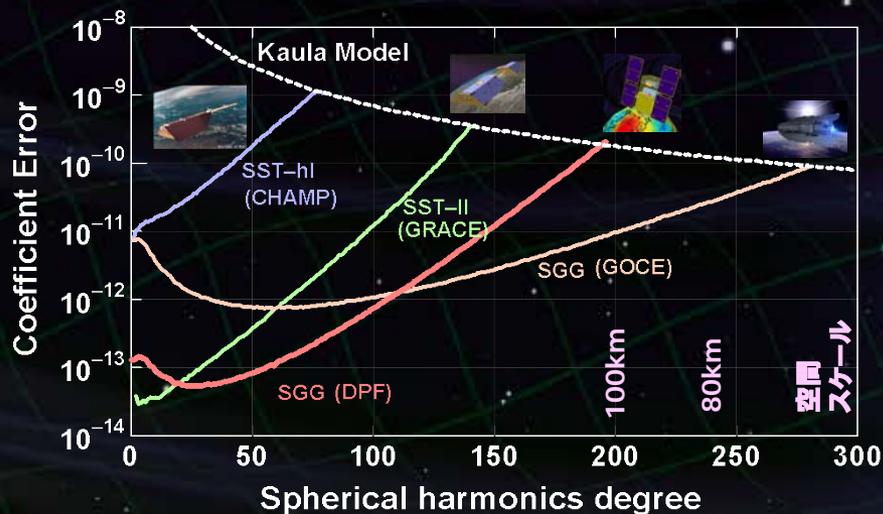
重力波により宇宙を見る
 銀河系内のBH連星合体
 → 巨大BH形成への知見.

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

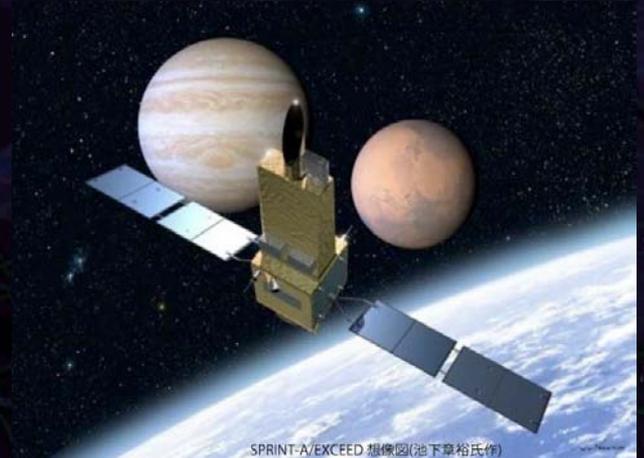
2号機 ERG (~2013年)

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



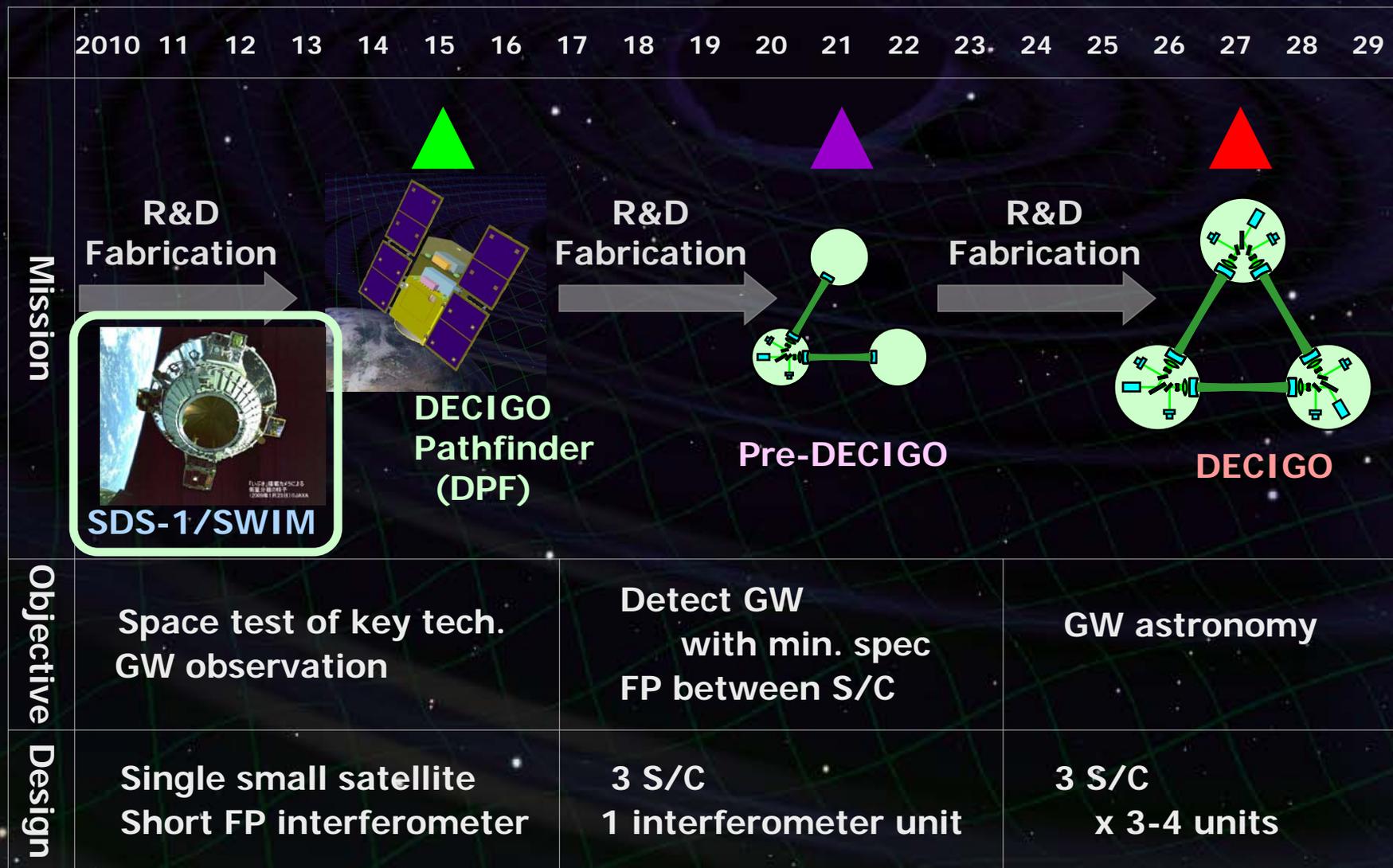
小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



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 μ 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 μ v代表: 安東

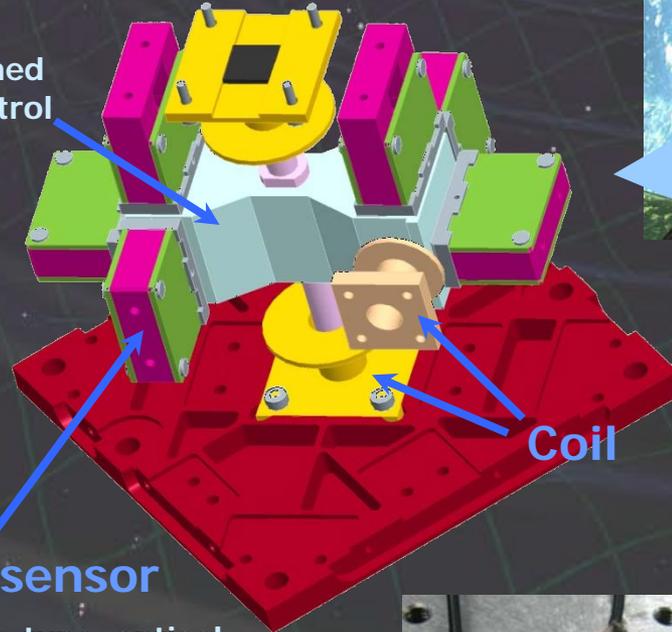
2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 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

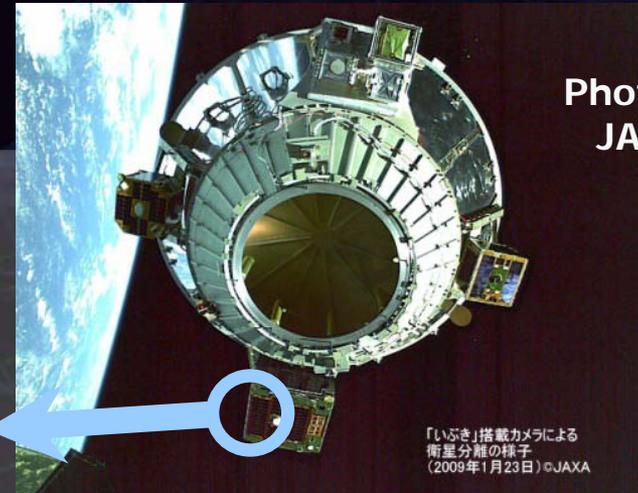
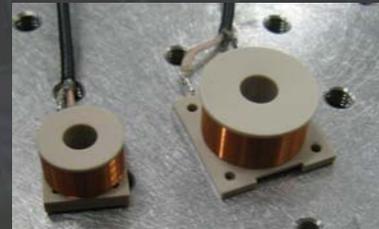


Photo:
JAXA

「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

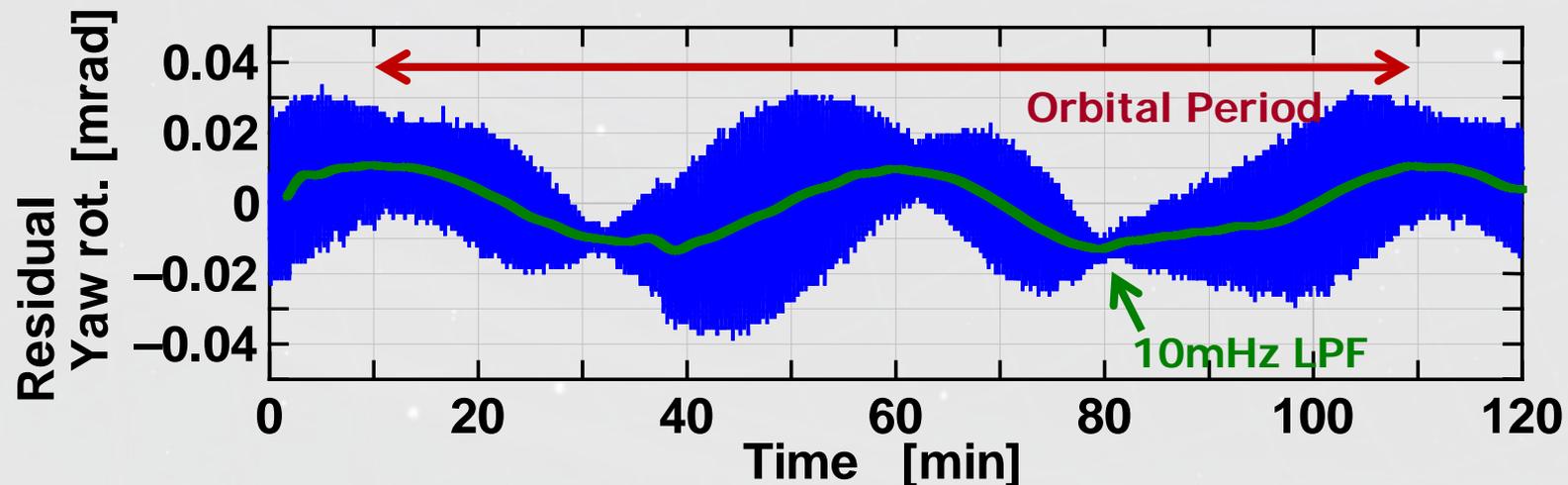
長時間データ取得

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

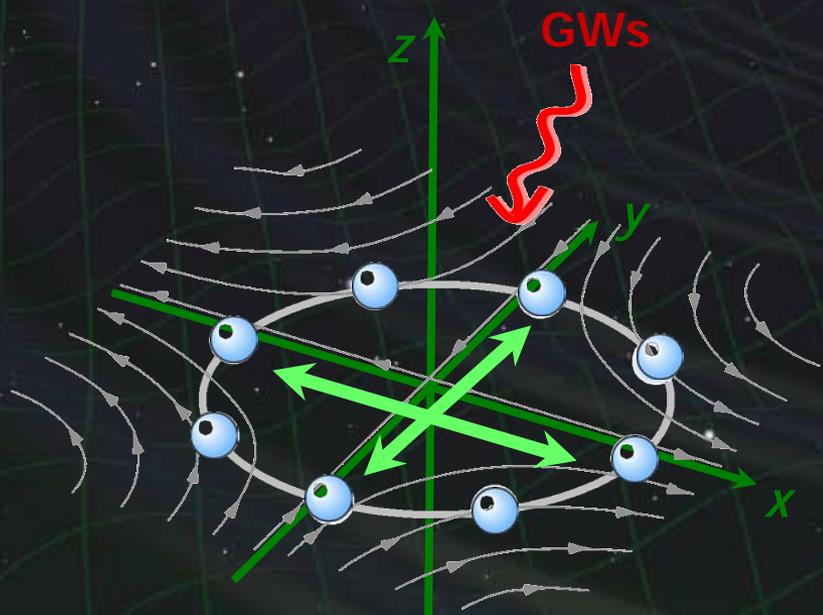


M.Ando, et. al,
PRL (in press)
online Oct. 2010

歪み観測と振じれ観測

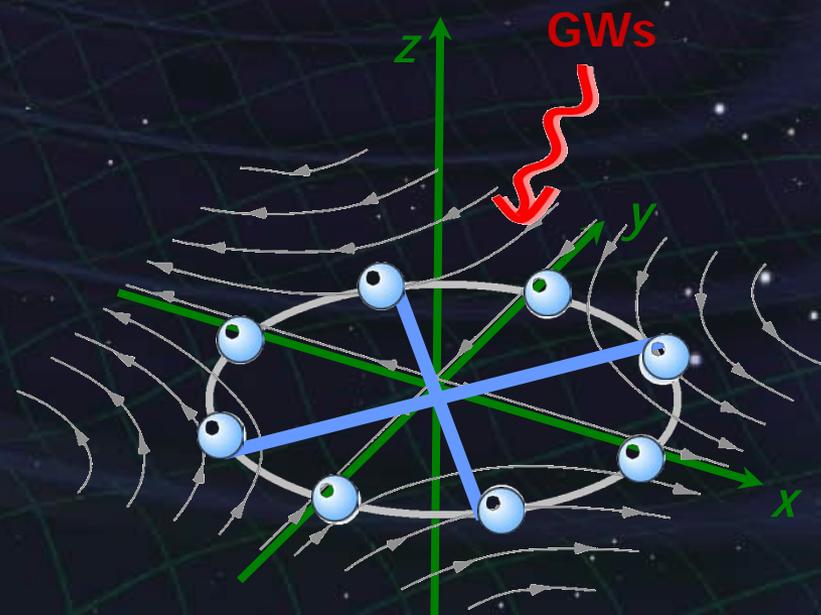
自由質点をレファレンスに、重力波による潮汐力変動を観測

Traditional IFO detector
Detect differential length change



差動歪み変動 $h \sim \frac{\delta L}{L}$

Torsion Detector
Detect differential rotation

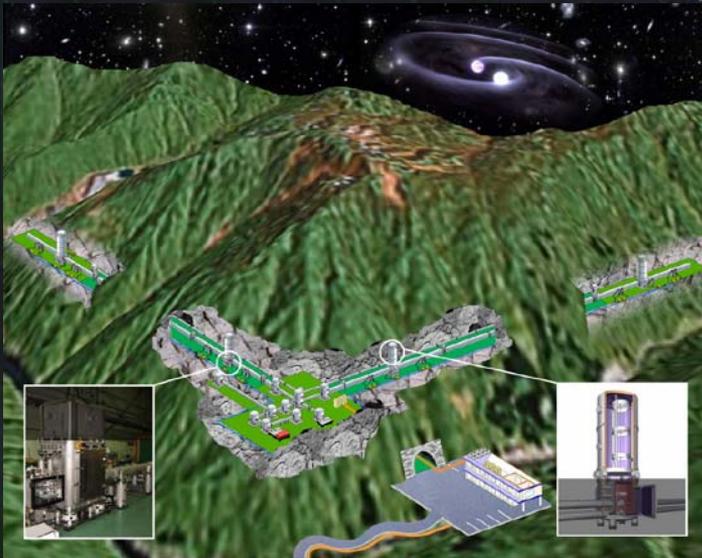


差動振じれ変動 $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$

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

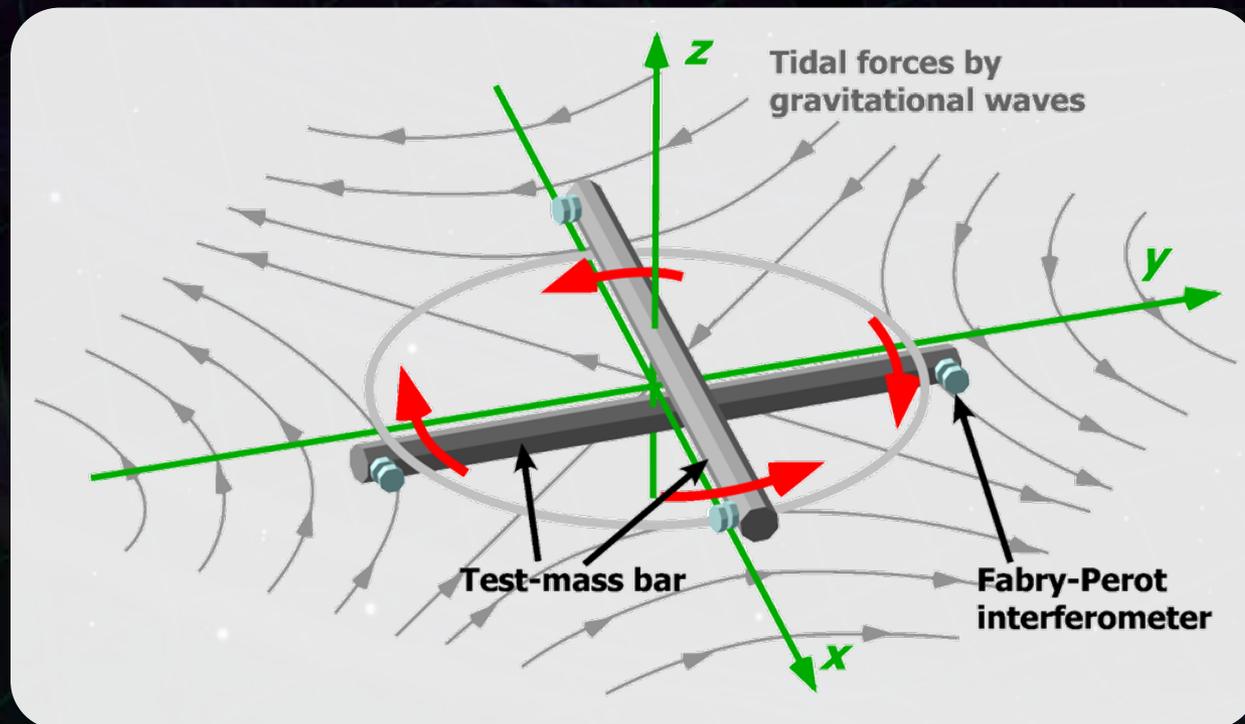
振じれ型アンテナ

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

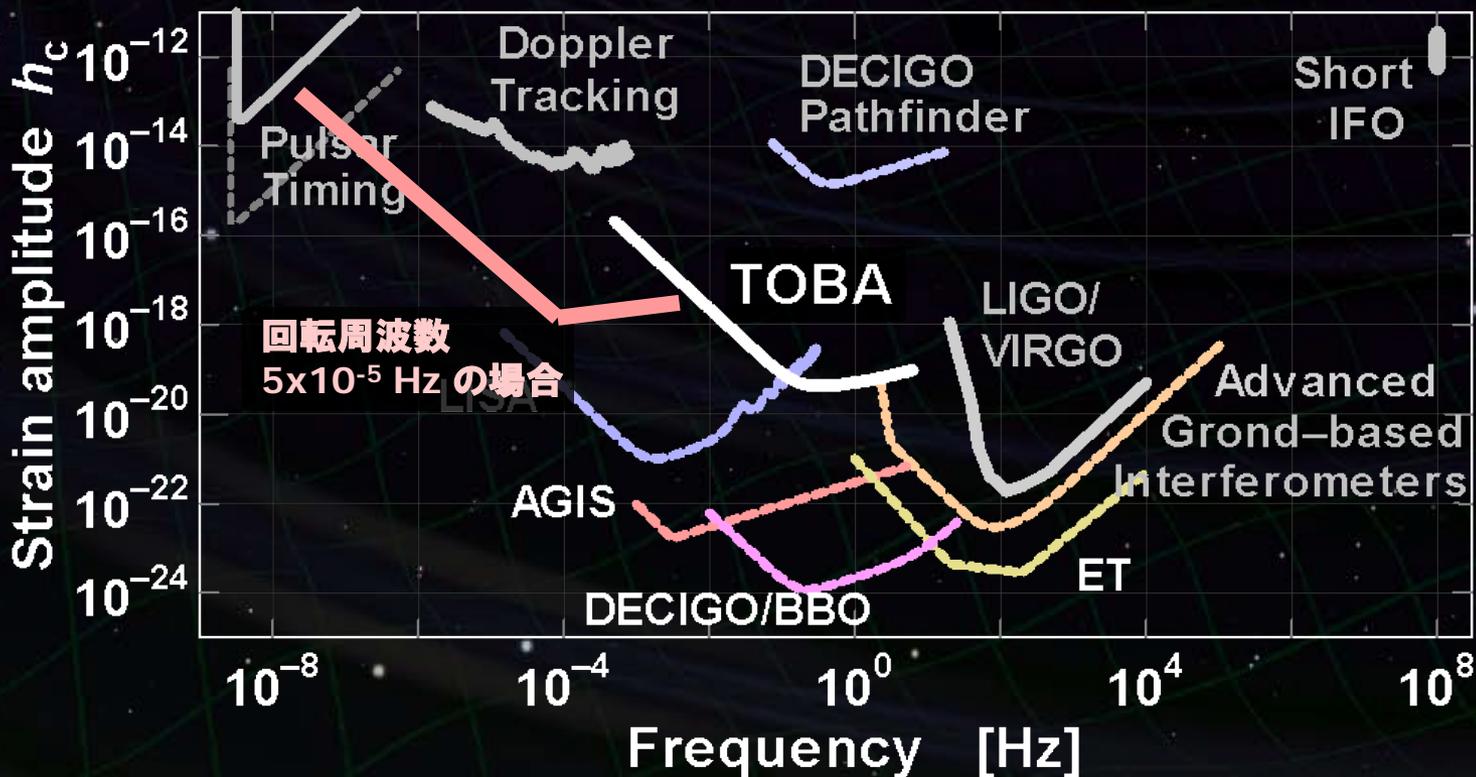
Bar length : 10m, Mass : 7600kg

Laser source : 1064nm, 10W

Cavity length : 1cm, Finesse : 100

Bar Q-value : 10^5 , Temp: 4K

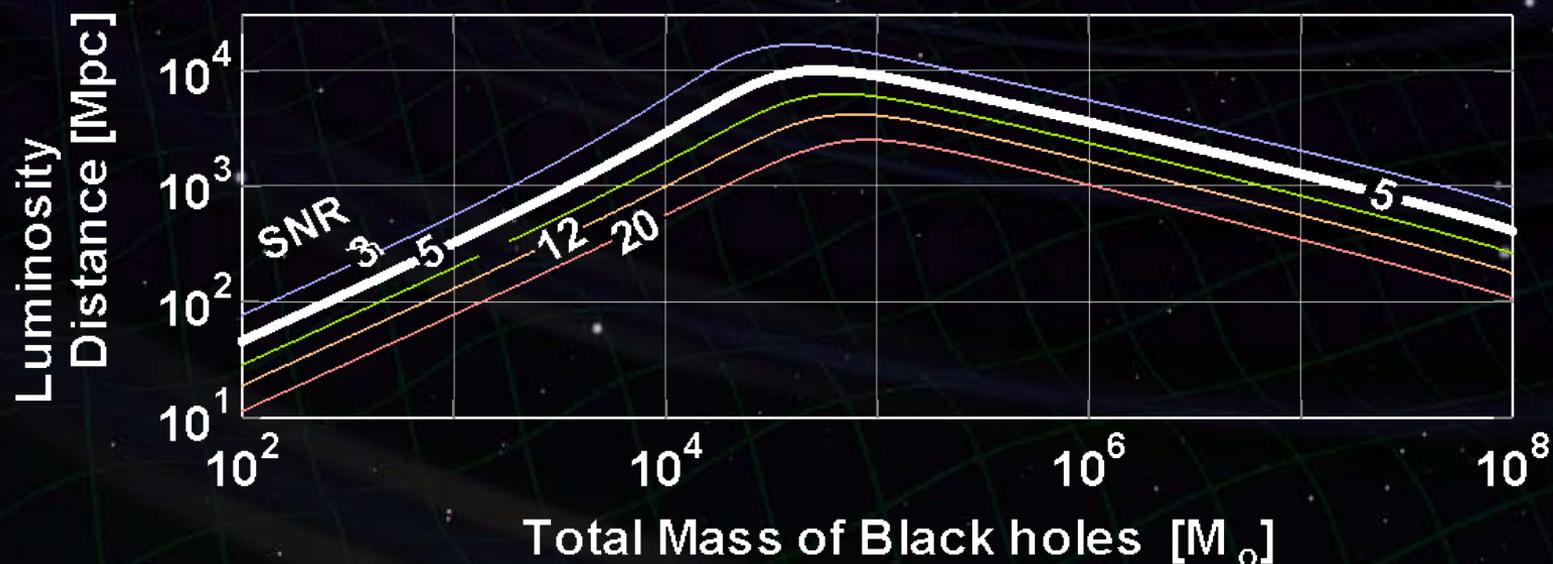
Support Loss : 10^{-10}



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

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

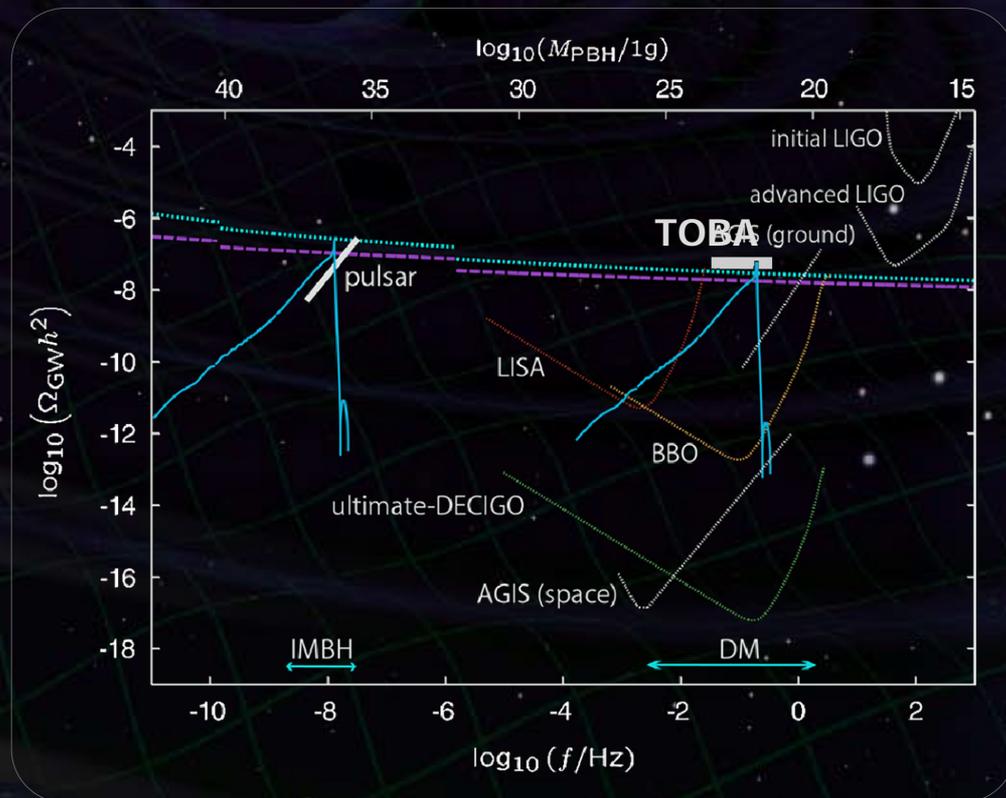
(1年間の観測)



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-)



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

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

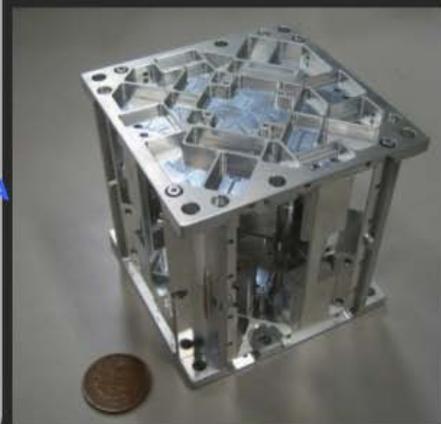
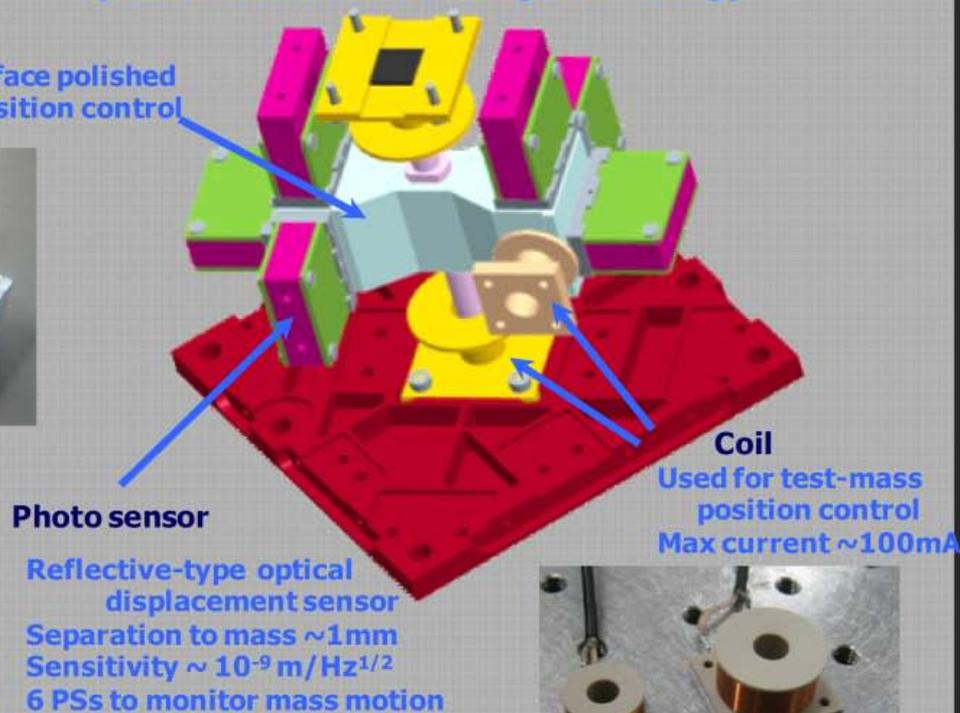
SWIM搭載モジュール

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

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

Test mass

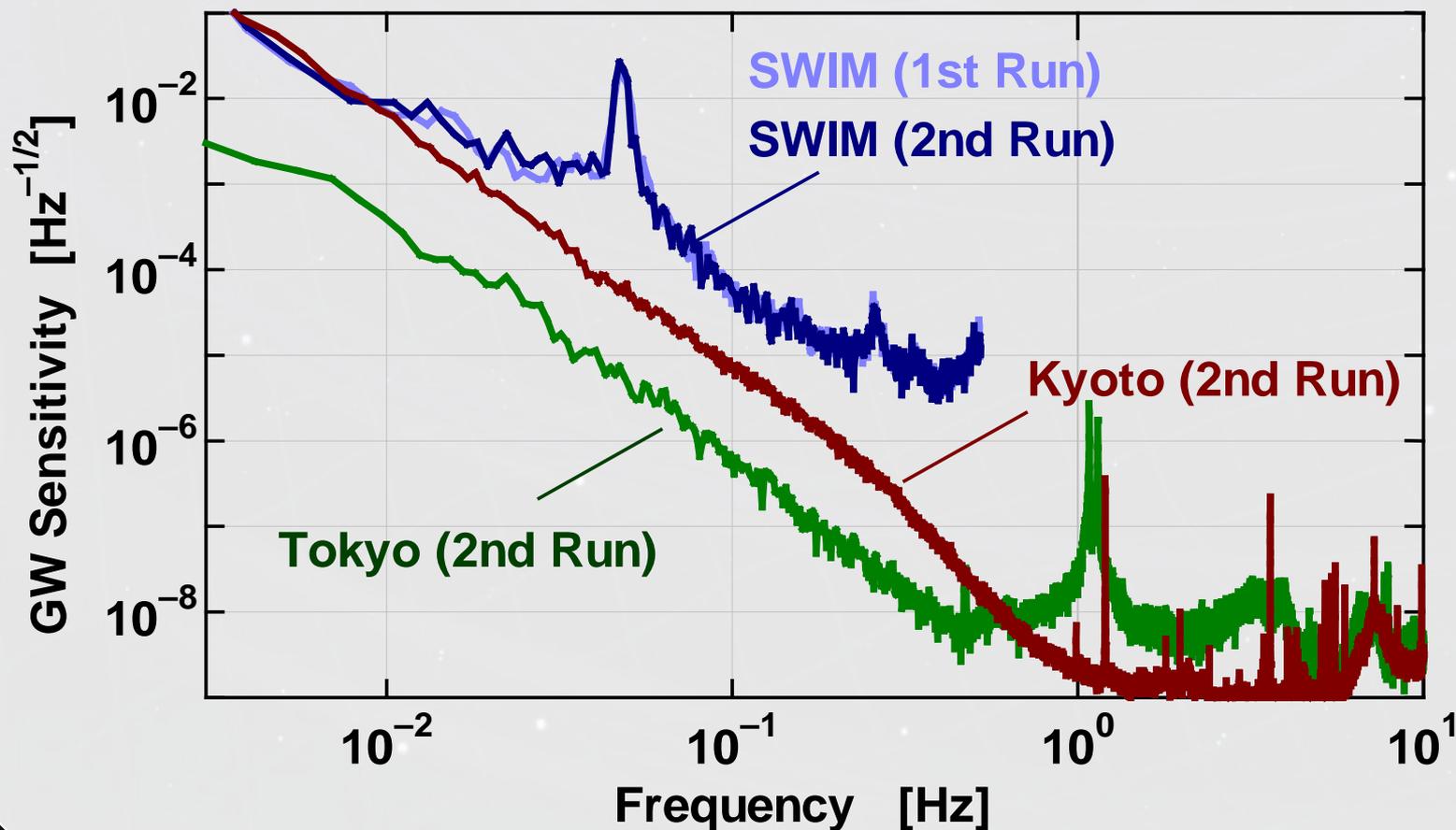
~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control



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

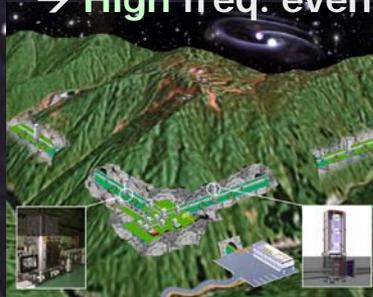


ここまでのまとめ

Gravity (2009~)
Test of gravity ISL



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



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



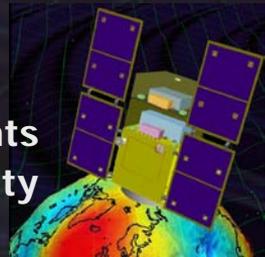
TOBA (2005~)
Novel Detector configuration



振じれ振子

低周波
数雑音

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

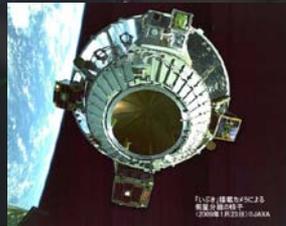


Pre-DECIGO (2021~)

Satellite Gravity (?~)
Space observatory
→ Earth environment



SWIM (2009~)
First module in orbit



回転TOBA

3. 微小距離重力

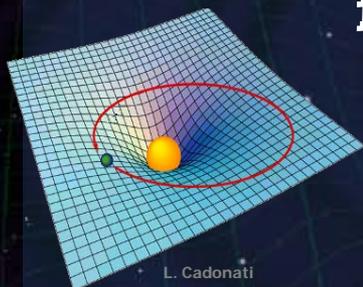
⇒ 重力の逆二乗則
振じれ振子実験
原子分光実験



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

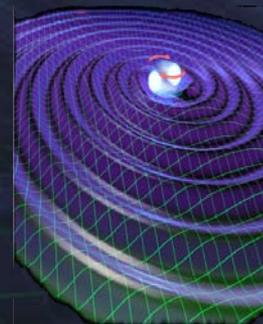
重力波天文学

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

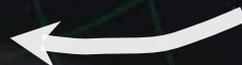
量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧

熱雑音, 地面振動

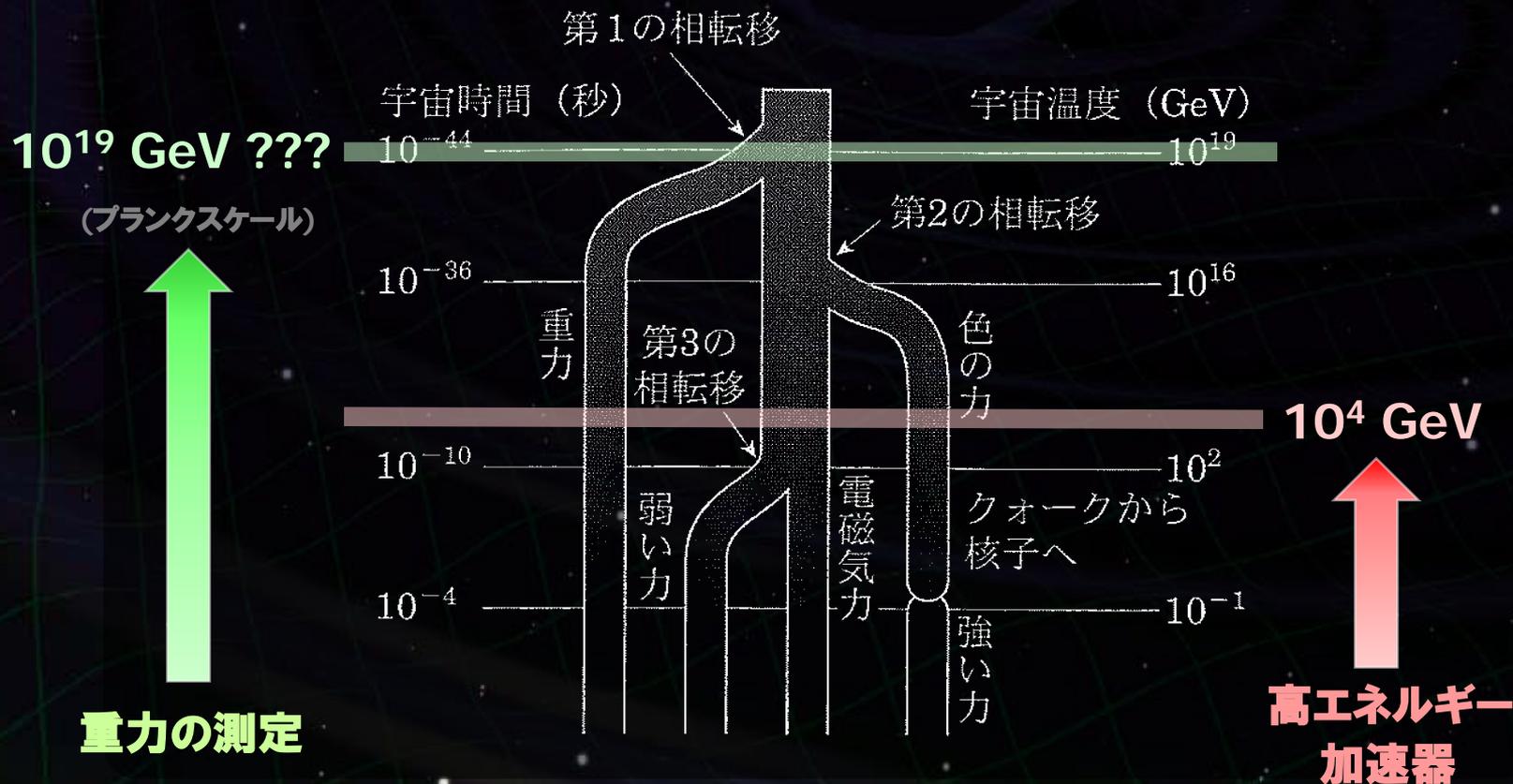
信号処理

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

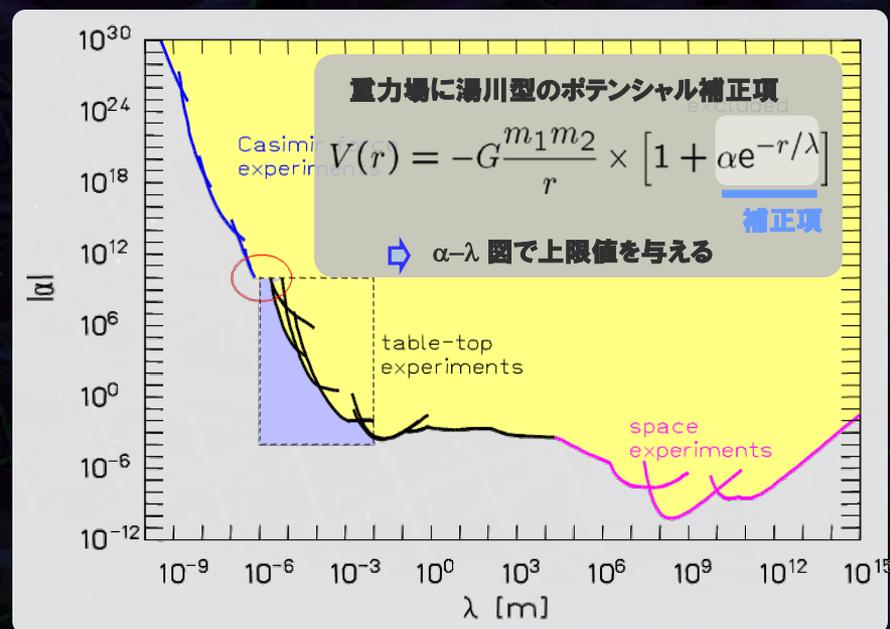
(Cosmological Constant Problem)

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



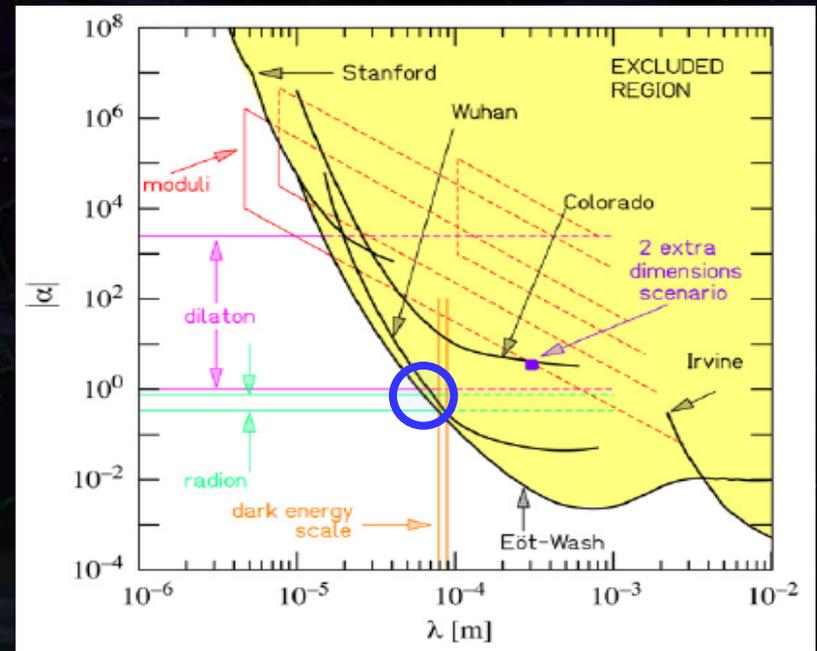
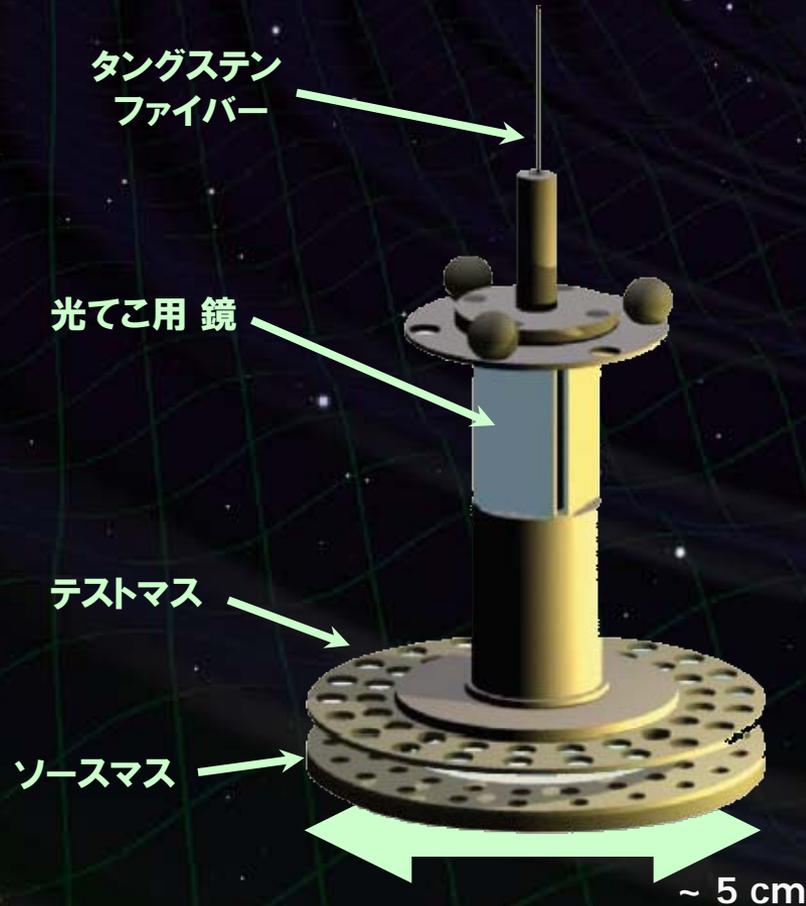
近年の検証実験

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

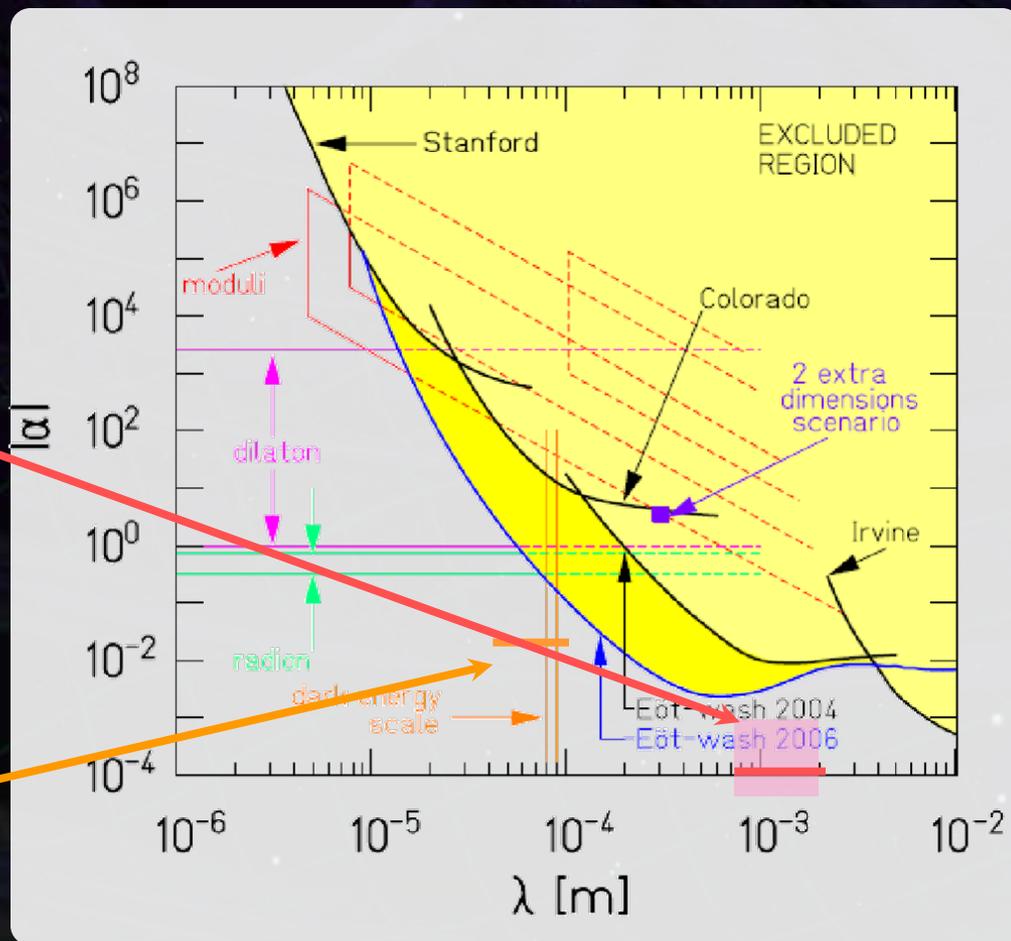
$$|\alpha| < 10^{-4}, \lambda = 1-3 \text{ mm}$$

(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

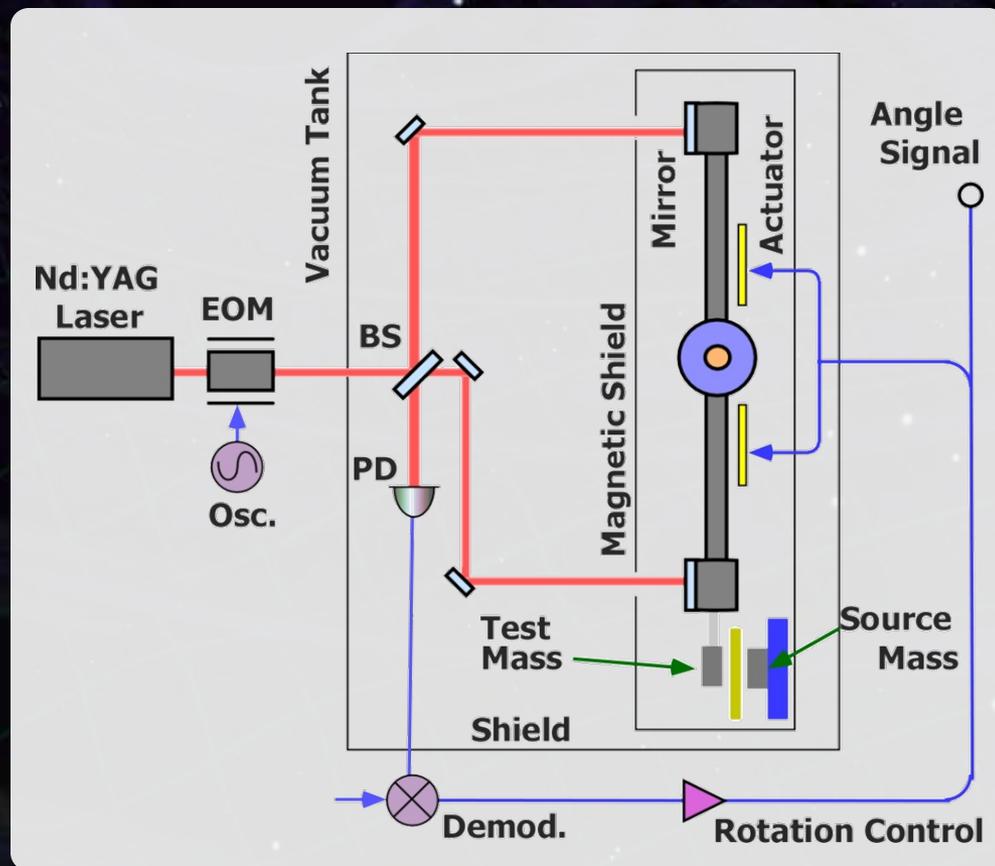
長さ 20cm程度の棒状ねじれ秤
先端にテストマス
近くにソースマスを設置

⇒ 重力による角度変動を
レーザー干渉計で測定

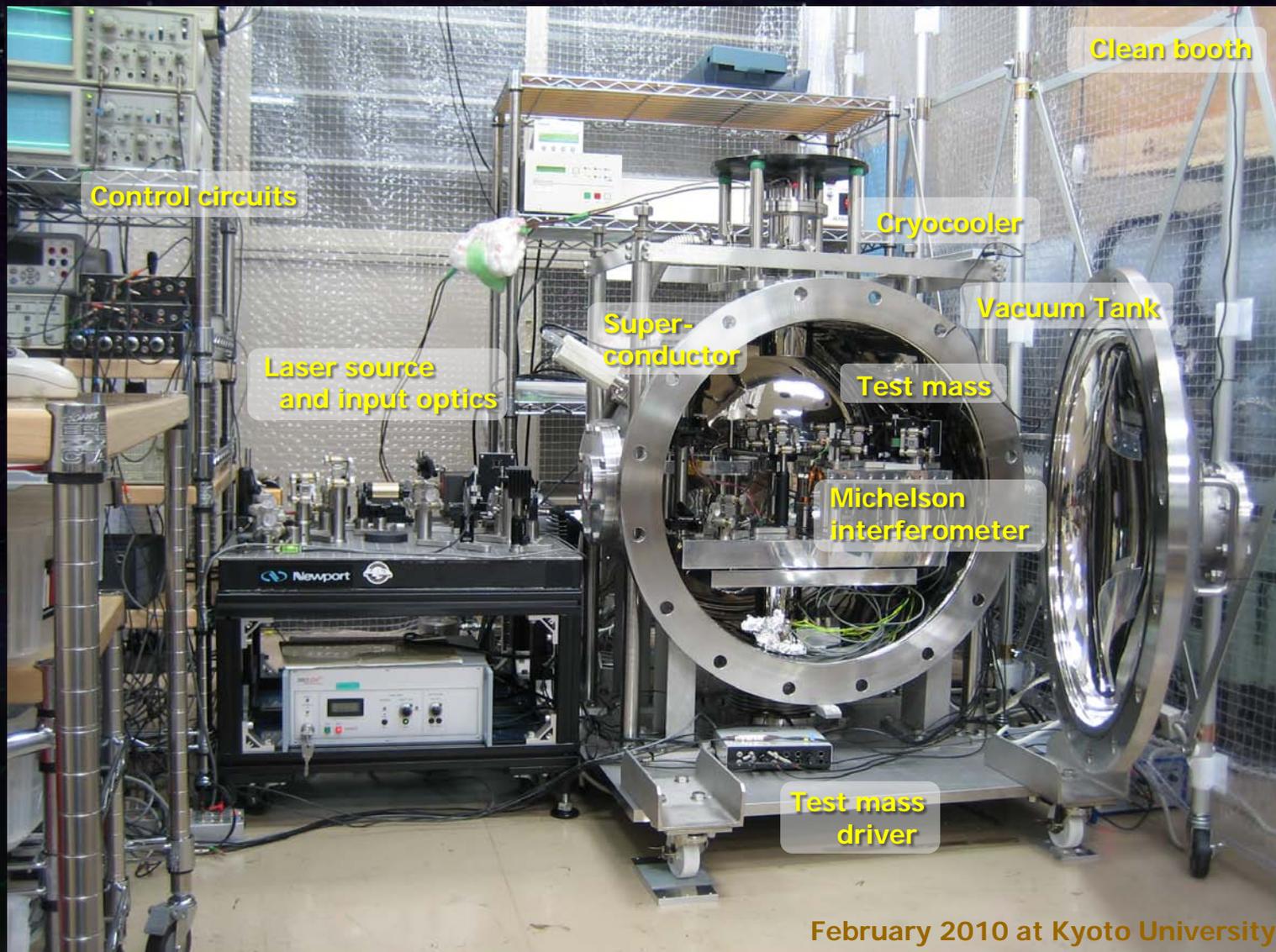
特徴

- (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

⇒ 2.5×10^{-10} N

見積もられる精度

良い帯域での感度: 5×10^{-15} N/Hz^{1/2}

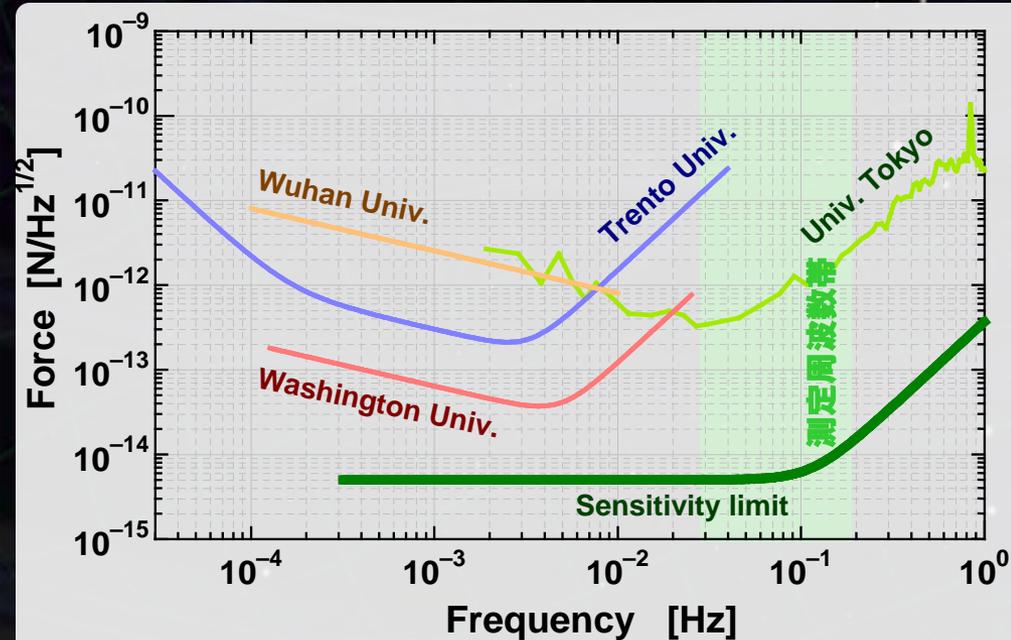
測定時間 : 10^2 sec

⇒ 5×10^{-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

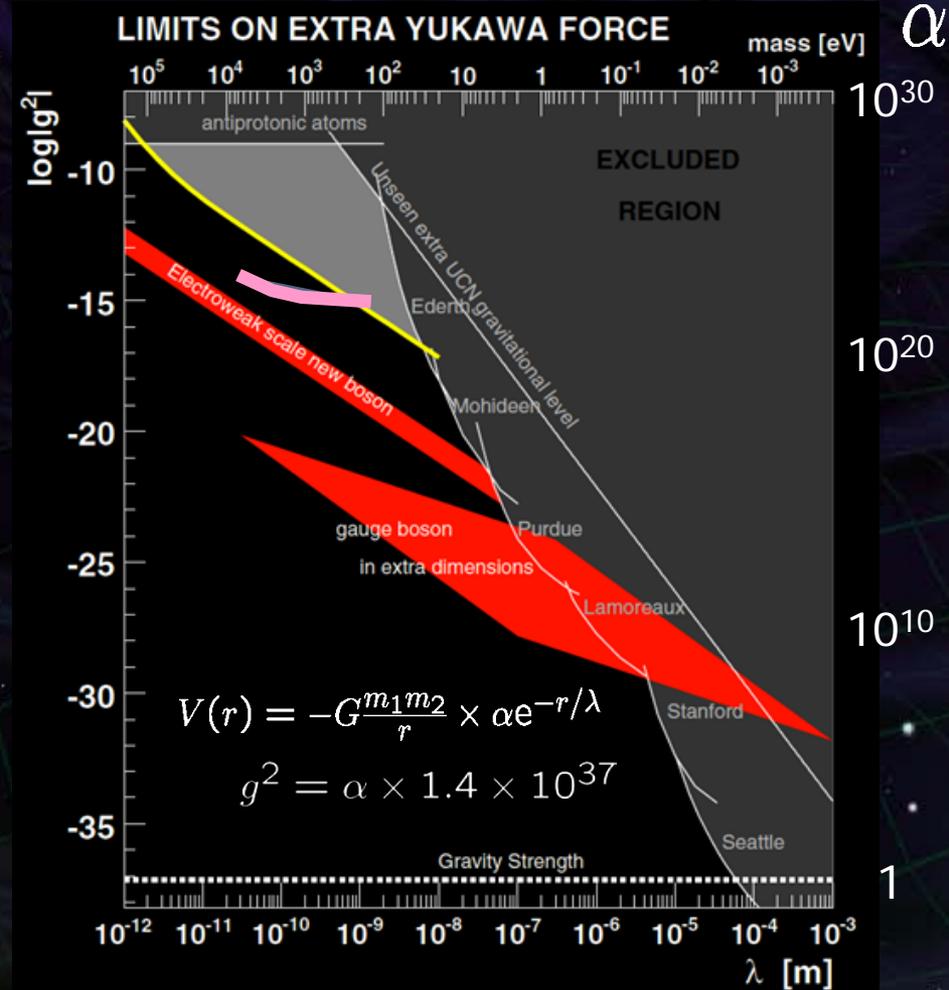
先行研究: 中性子散乱実験の解釈
 $\alpha < 10^{23}$ ($\lambda \sim 1$ nm)



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

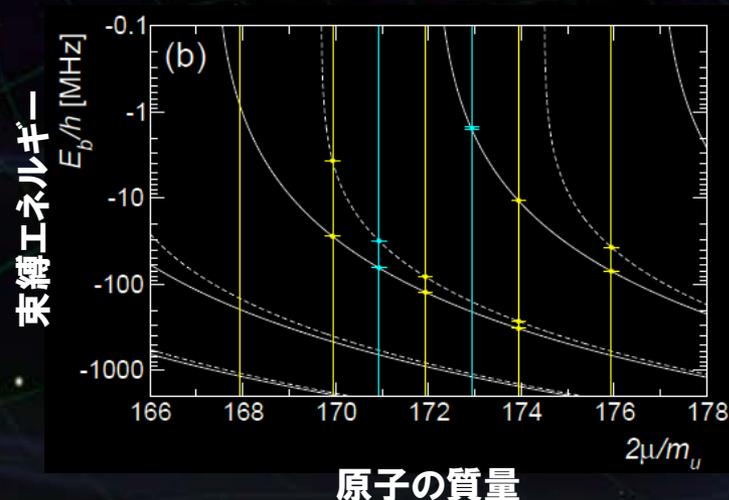
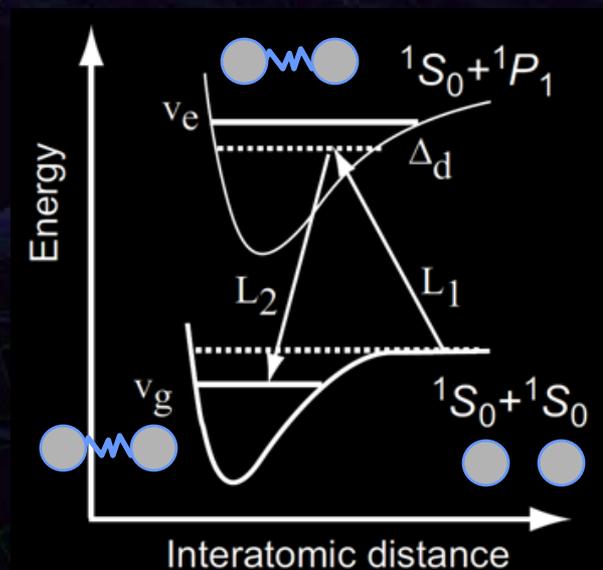
Born-Oppenheimerポテンシャルでモデル化

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

- ⇨ 100kHz以下の精度で一致

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

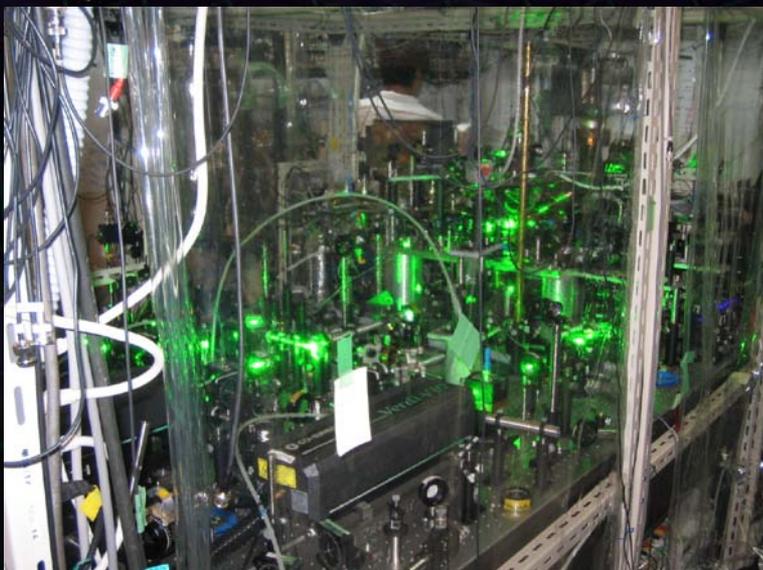
重力補正項に対する
上限値を与えることが可能.



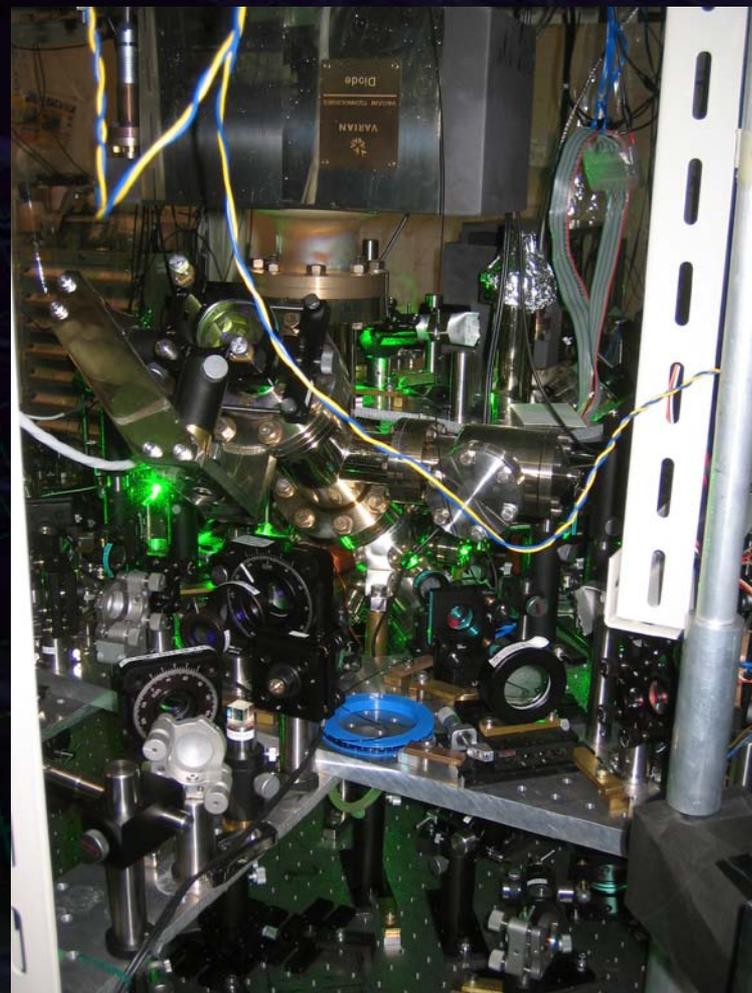
実験の現状

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

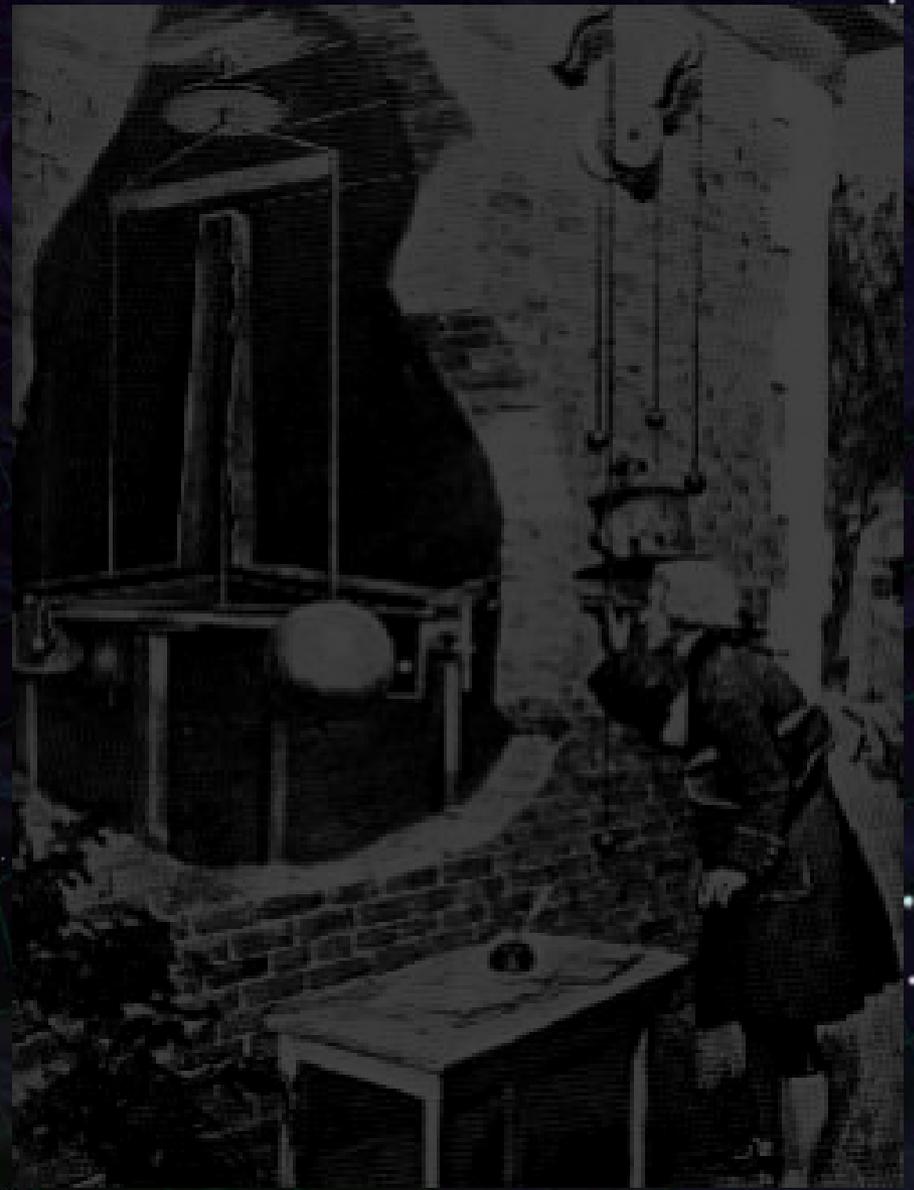


光トラップおよび
2光子光会合測定装置



4. まとめ

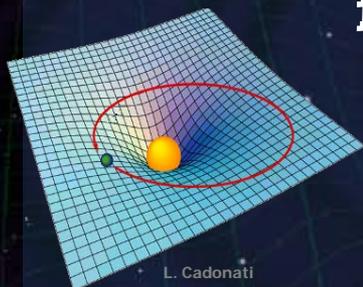
⇒ まとめ



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

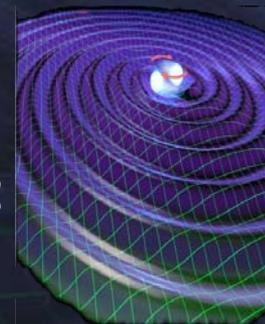
重力波天文学

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

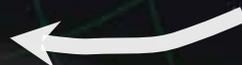
量子光学, 観測理論

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

