

※ ファクター程度の計算式の誤りがある可能性があります。

TOBAの設計検討と展望

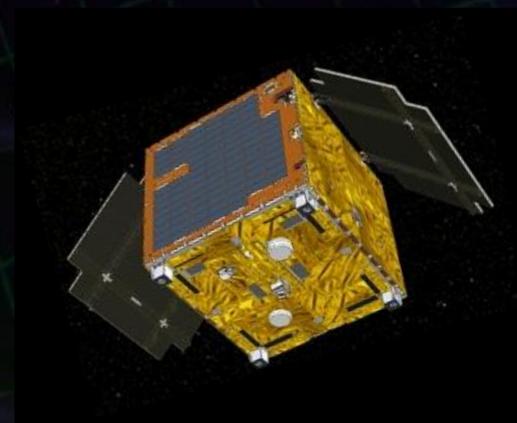
安東 正樹



Small-scale TOBA at Tokyo



Small-scale TOBA at Kyoto



SWIM on SDS-1 satellite

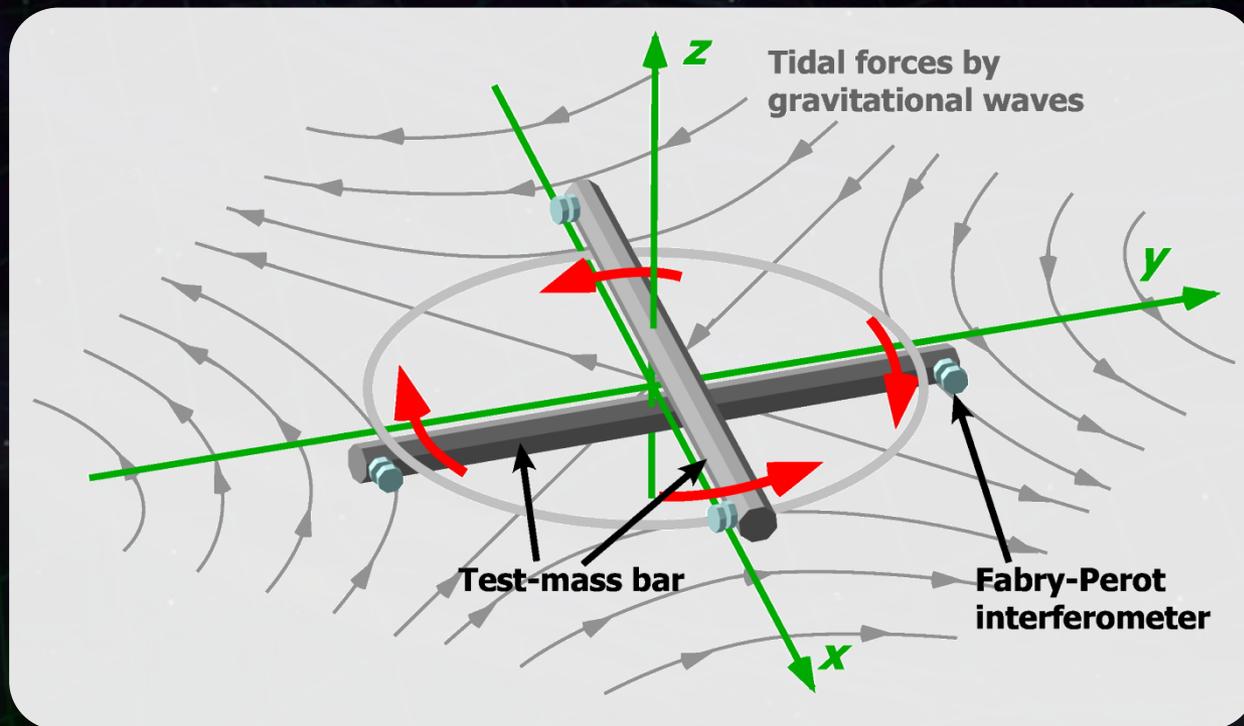
イントロダクション

振じれ型重力波アンテナ

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

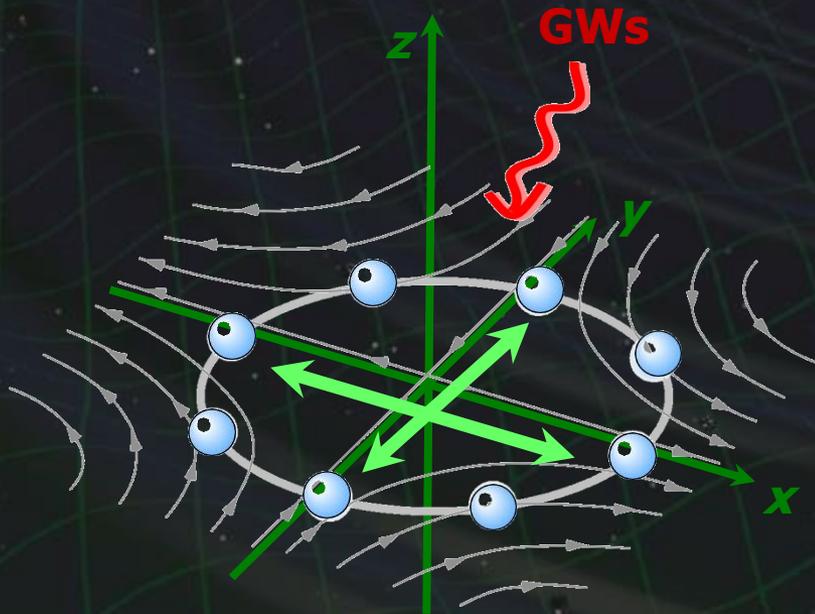
⇒ 重力波による差動回転変動を観測



歪み観測と捩じれ観測

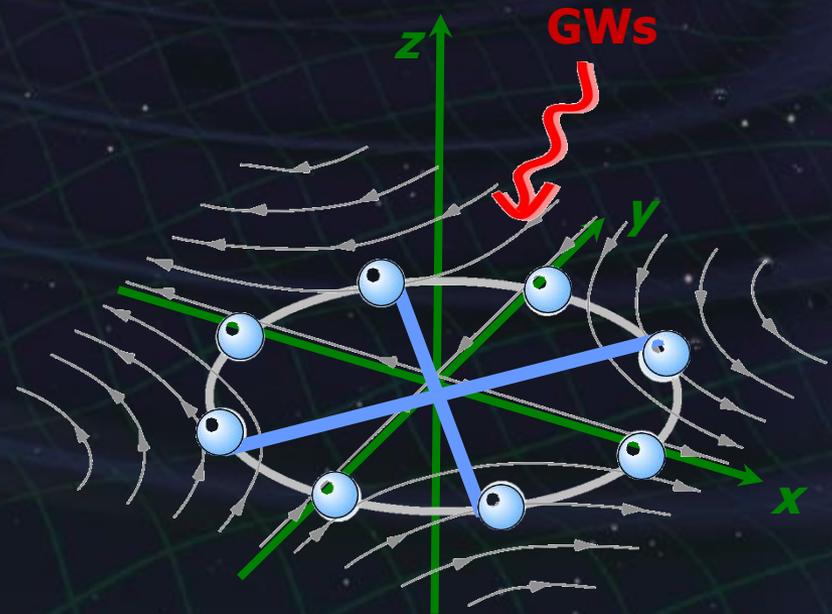
自由質点をレファレンスに、重力波による潮汐力変動を観測

Traditional IFO detector
Detect differential length change



差動歪み変動 $h \sim \frac{\delta L}{L}$

Torsion Detector
Detect differential rotation



差動捩じれ変動 $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$

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

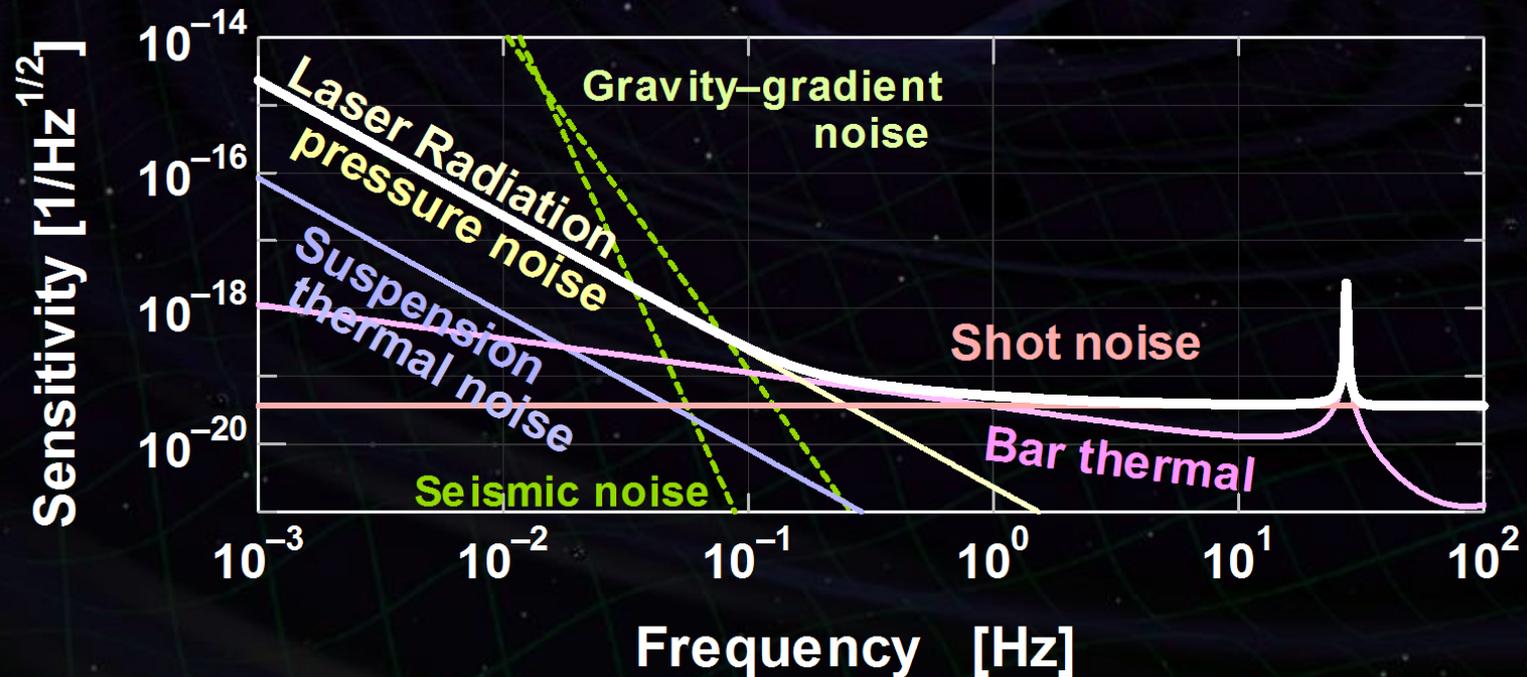


試験マス: 振じれ振子で懸架
(共振周波数 $\sim 1\text{mHz}$)

長基線は必要ない
→ シンプルな構成, 外乱除去

Fundamental noise level of final TOBA

Practical parameters $\Rightarrow \tilde{h} \simeq 3 \times 10^{-19}$ [Hz^{-1/2}] (at 0.1 Hz)



Bar length : 10m, Mass : 7600kg
Laser source : 1064nm, 10W
Cavity length : 1cm, Finesse : 100
Bar Q-value : 10⁵, Temp: 4K
Support Loss : 10⁻¹⁰

Laser Freq. noise < 10Hz/Hz^{1/2},
Freq. Noise CMRR > 100
Intensity noise < 10⁻⁷/Hz^{1/2},
Bar residual RMS motion < 10⁻¹² m

TOBAの感度

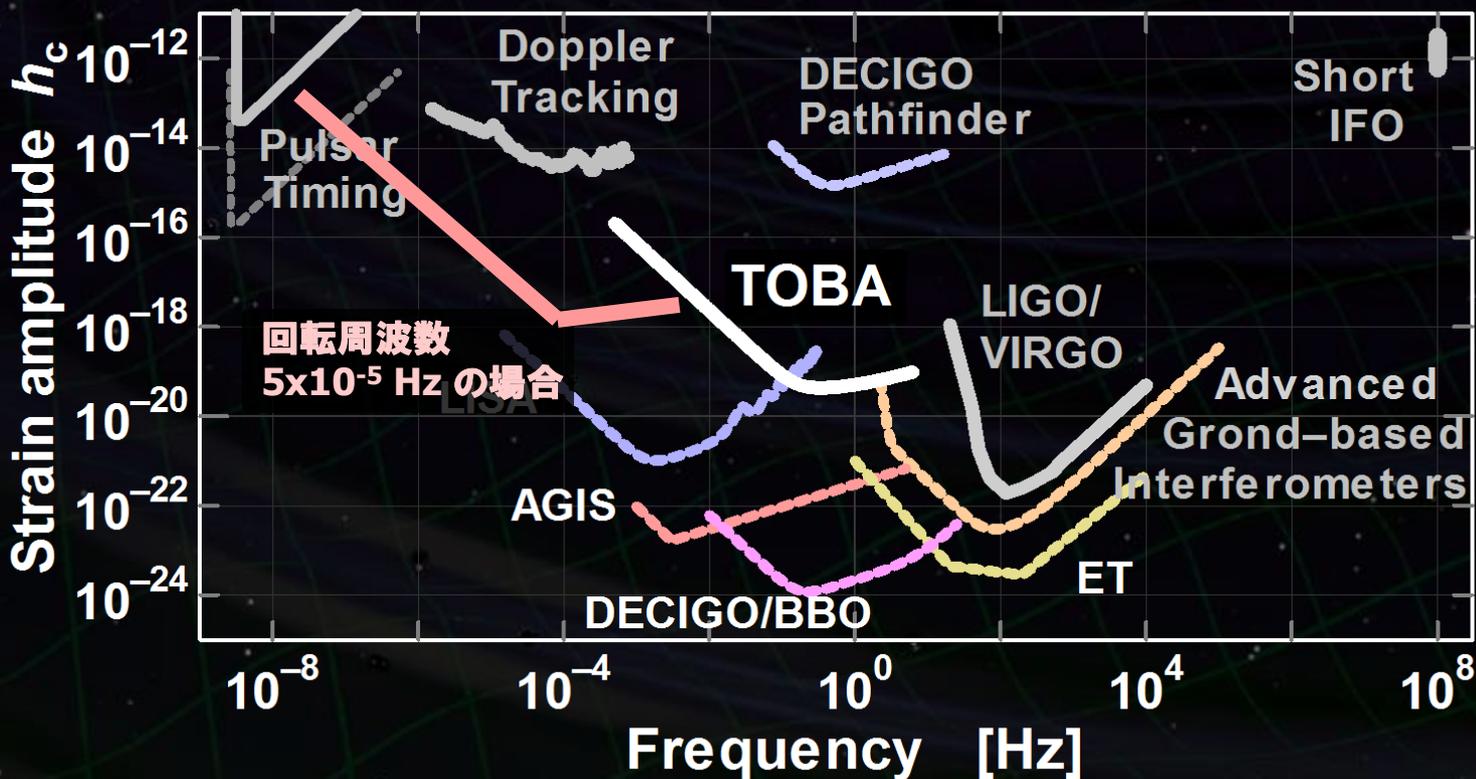
現実的なパラメータを仮定

試験質量 質量 7,600kg, 長さ 10m

レーザー光源 10W

低温動作 4K

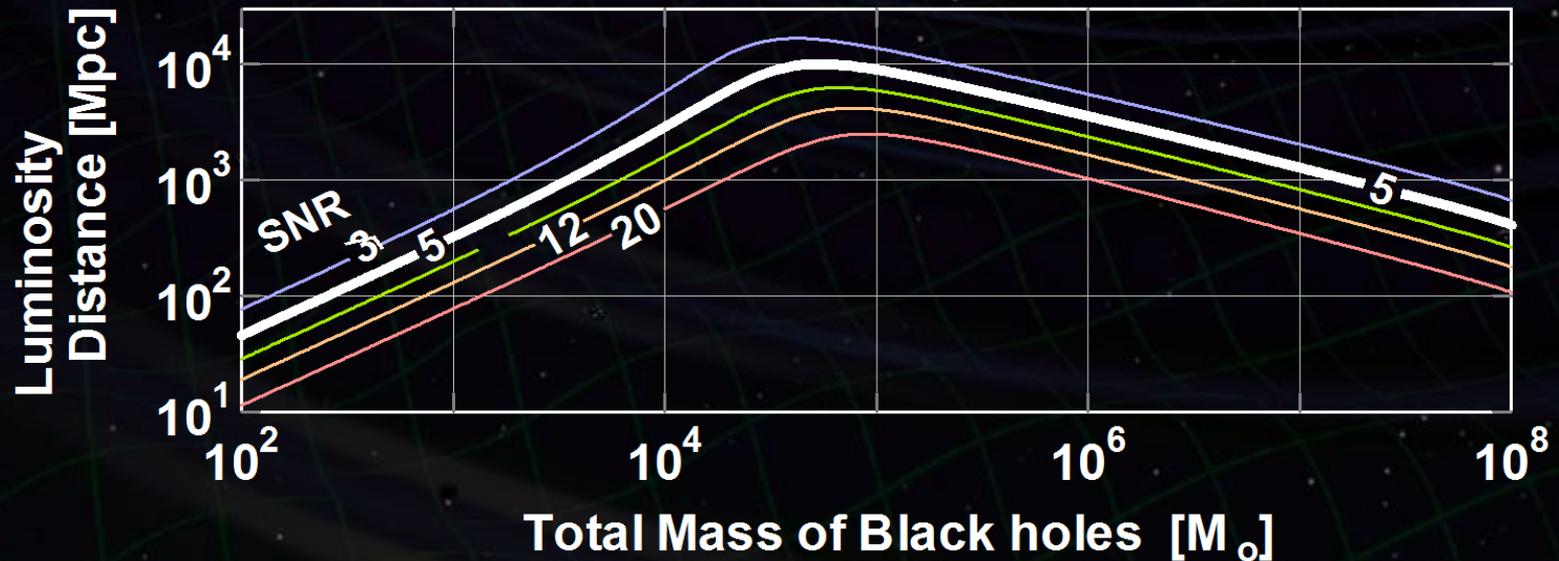
Bar length : 10m, Mass : 7600kg
Laser source : 1064nm, 10W
Cavity length : 1cm, Finesse : 100
Bar Q-value : 10^5 , Temp: 4K
Support Loss : 10^{-10}



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

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

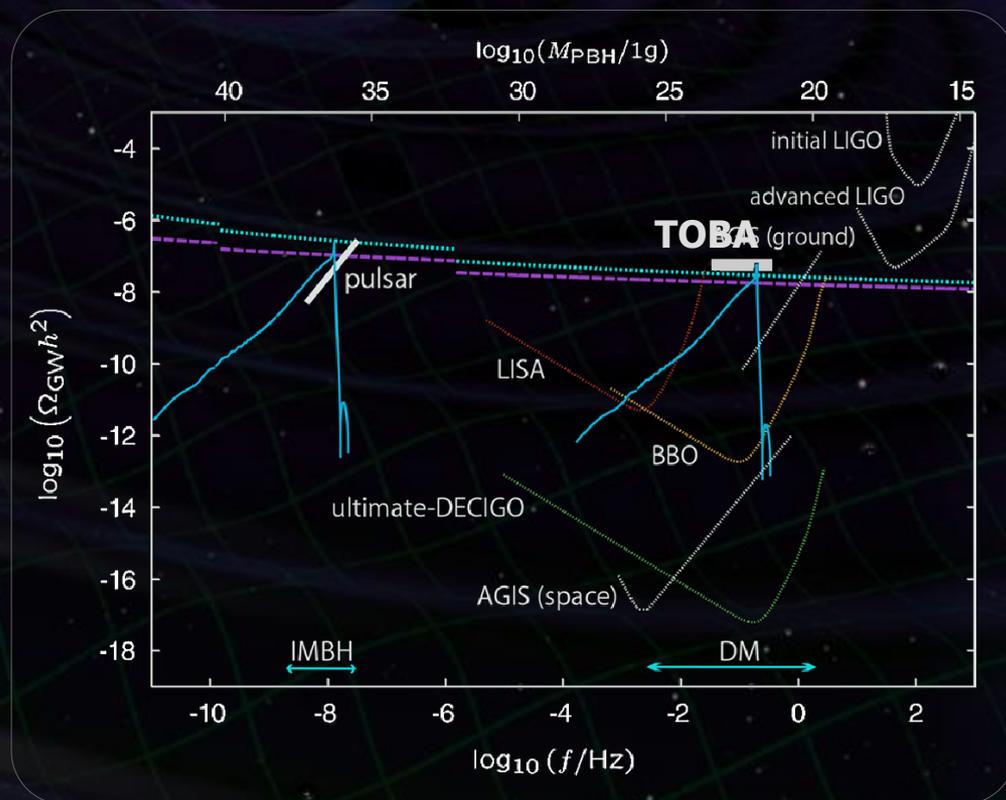
(1年間の観測)



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

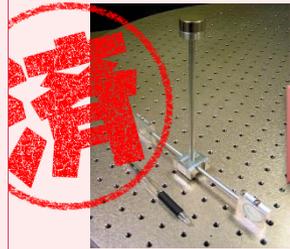
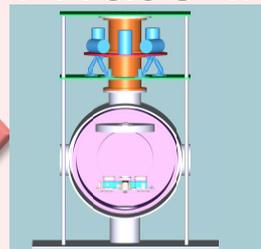
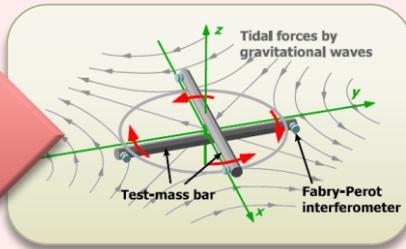
R.Saito and J.Yokoyama,
PRL 102, 161101 (2009)



プロトタイプ TOBA

正田さん資料より

今後の展望

		Phase-I	Phase-II		Final
					
懸架系	TMサイズ	小型(20cm)	小型(25cm)		大型(10m)
	TM本数	1本	2本		2本
	Multi-Output	×	○	...	○
	防振系	×	○ 受動+能動		○
	低散逸懸架	△	×		○
センサー(干渉計)		Michelson	Michelson		Fabry-Perot
低温		×	×		○

$h \sim 10^{-8} @ 1\text{Hz}$

原理検証

背景重力波初観測

$h \sim 10^{-10} @ 1\text{Hz}$

懸架系の確立

IMBH初観測

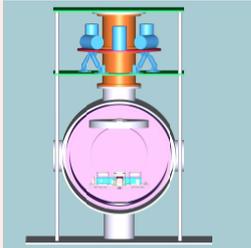
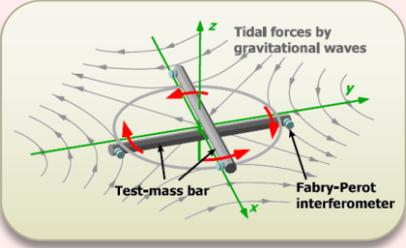
$h \sim 10^{-19} @ 1\text{Hz}$

重力波天文学

中間発表会 (April 15th, 2015)

正田さん資料より

技術の展望

		Phase-II	Phase-III	Final
				
懸架系	TMサイズ	小型(25cm)	中型(1m)	大型(10m)
	TM本数	2本	2本	2本
	Multi-Output	○	○	○
	防振系	○ 受動 + 能動	○ 受動 + 能動	○
	低散逸懸架	×	○	○
センサー(干渉計)		Michelson	Michelson	Fabry-Perot
低温		×	○	○

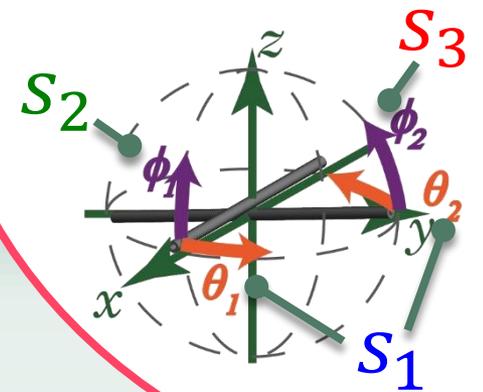
↓
 $h \sim 10^{-10}$ @ 1Hz
 懸架系の確立
 IMBH初観測

↓
 $h \sim 10^{-15}$ @ 1Hz
 天の川銀河内の探査
 地震速報への応用

↓
 $h \sim 10^{-19}$ @ 1Hz
 重力波天文学

正田さん資料より

低周波重力波観測のための重力波検出器 Phase-II TOBAを開発



Multi-outputの実証

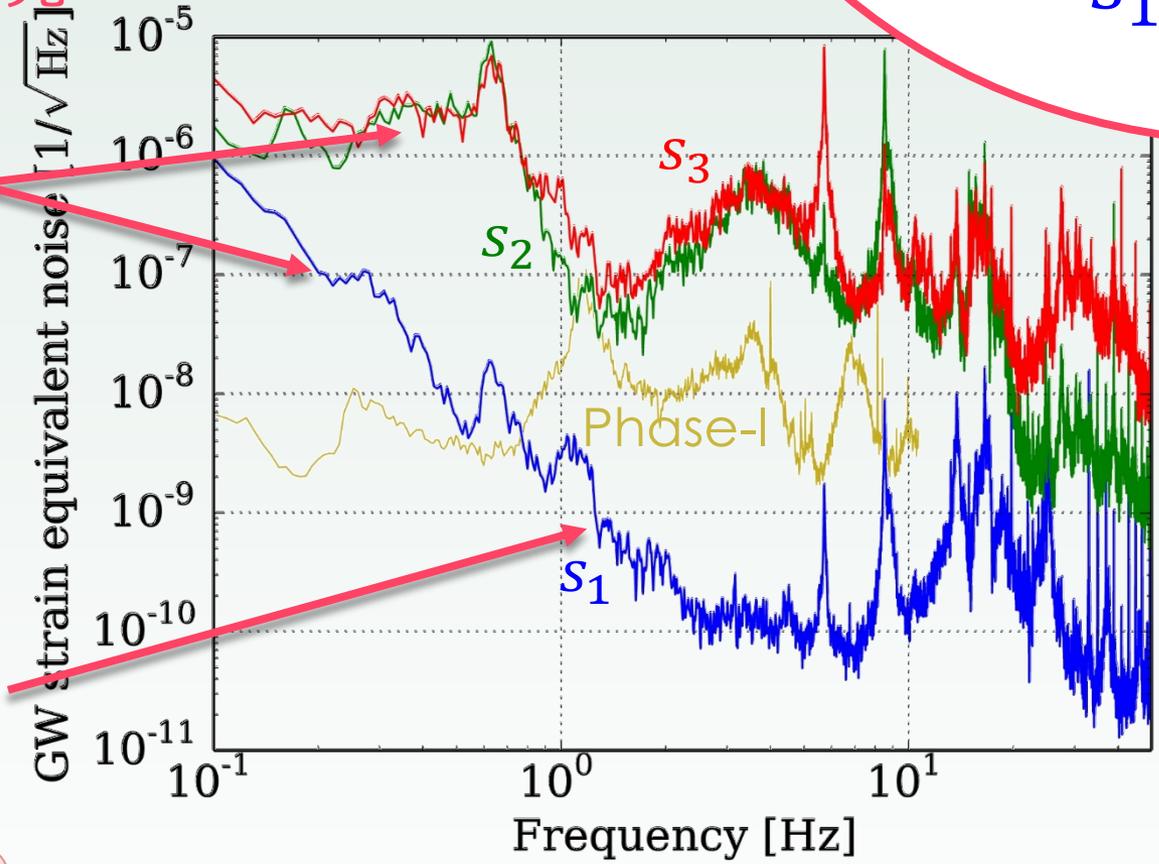


Event rate 角度分解能の向上

Suspension systemの確立 (受動+能動)

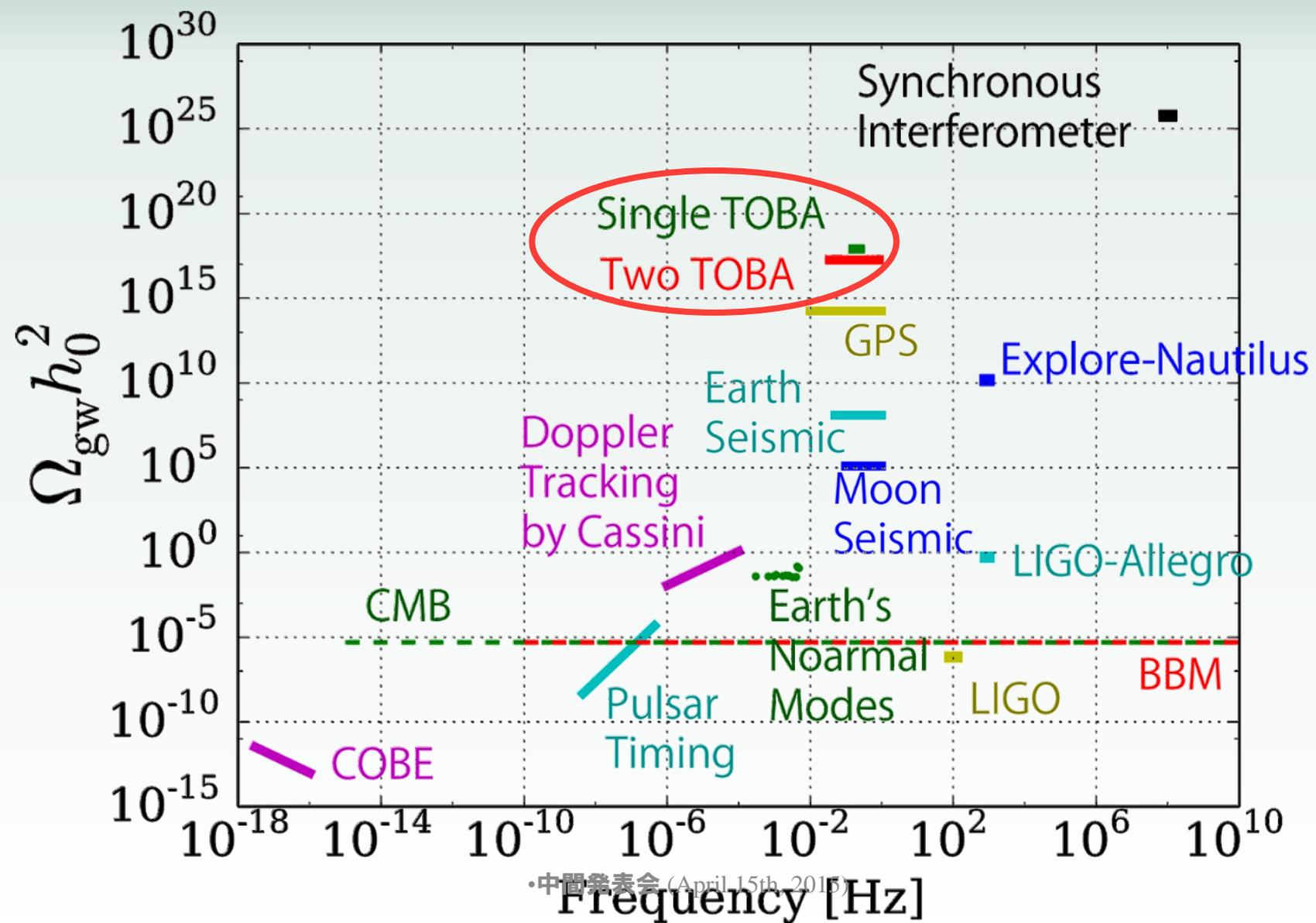


地面振動雑音の低減



正田さん資料より

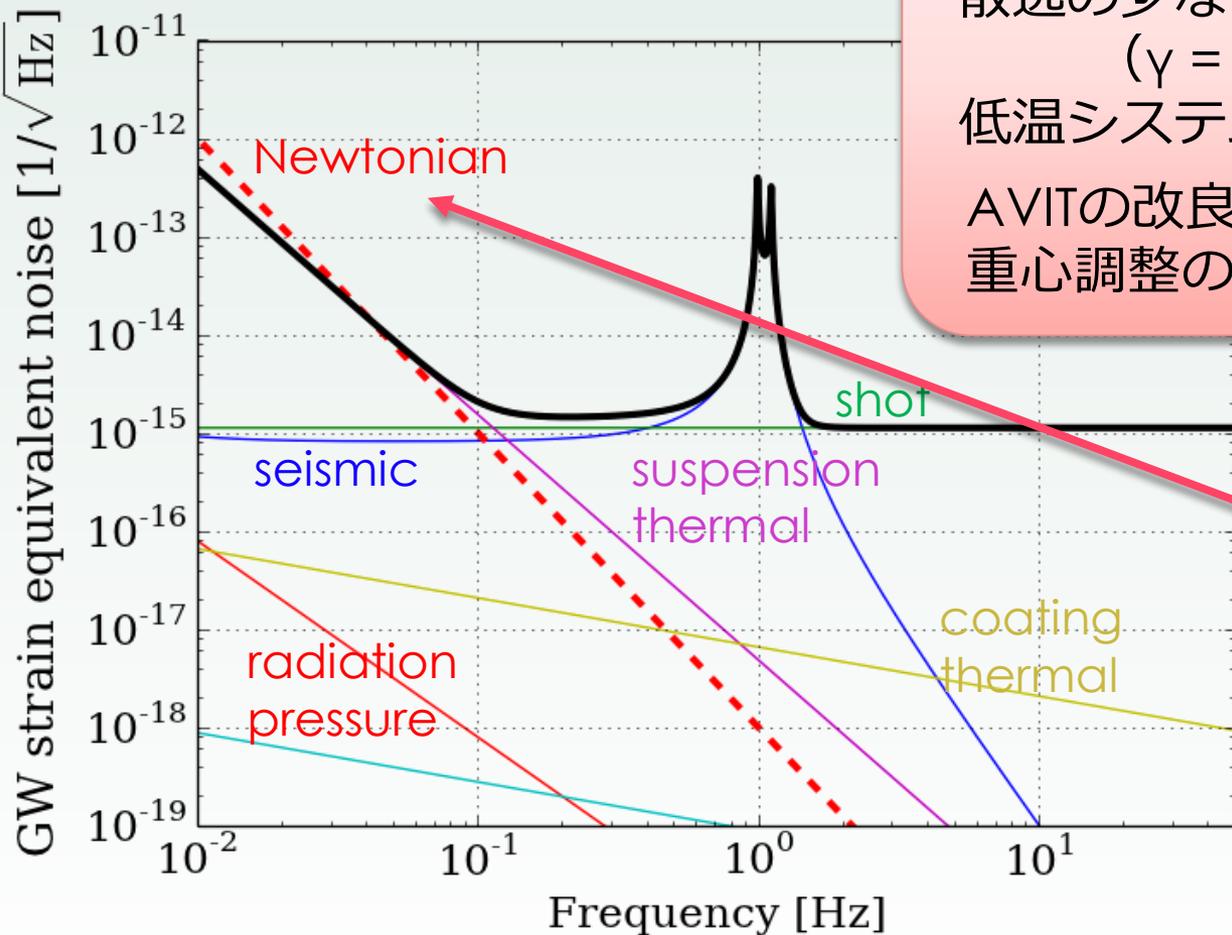
重力波の観測



正田さん資料より

技術の展望

Phase-III TOBA 我々の銀河中心から来るIMBH合体を捉えられる感度



散逸の少ない懸架系
($\gamma = 6 \times 10^{-7}$)
低温システム (4K)
AVITの改良/OB形状の改良
重心調整の精度: 1mm

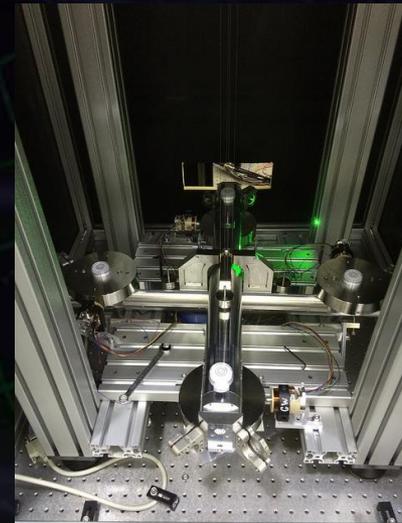
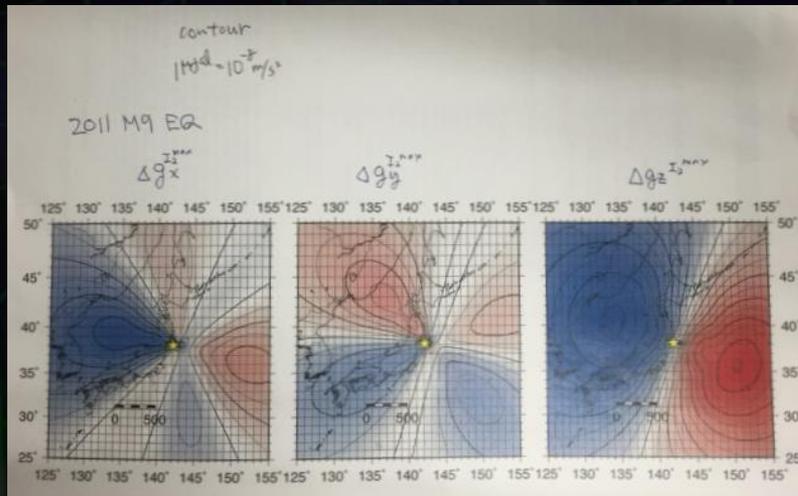
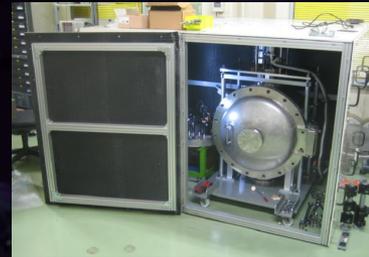
熱雑音の低減

重力勾配によって
生じる雑音 (未観測)

地震速報
への応用

TOBA Activities

- 東京大 : プロトタイプ, SWIM
- オーストラリア : TOBA ANU
- フランス : E-GRAAL
(Earthquake GRAvity ALerts)
- 東京大・地震研 : 地震即時検出



Phase-III TOBA

Phase-III TOBAの目的

- 低周波数帯での重力波観測。
 - 0.1Hz での世界最高感度での観測。
- Newton重力場変動の直接測定。
 - 地上重力波望遠鏡の低周波雑音キャンセル。
- 世界最高感度での微小力測定。
 - 量子測定, 基礎物理実験, 宇宙重力波望遠鏡。
- 地震の即時検出。
- 低温懸架・低周波数防振技術。
 - KAGRA, ET, ...

Phase-III TOBA 要求値

要求値: $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$) の重力波感度.

* 試験マス回転変動換算

$$\delta\theta = \frac{\alpha}{2} h \cong \underline{5 \times 10^{-16}} \quad [\text{rad/Hz}^{1/2}]$$

* 外乱トルク換算

$$\begin{aligned} \delta T &= I\omega^2 \delta\theta \\ &\cong \underline{1.2 \times 10^{-17}} \cdot \left(\frac{I}{0.057 \text{ kg}\cdot\text{m}^2} \right) \cdot \left(\frac{0.1 \text{ Hz}}{f} \right)^2 \quad [\text{N}\cdot\text{m/Hz}^{1/2}] \end{aligned}$$

* 端点での差動力換算

$$\delta F = \frac{\delta T}{L} \cong \underline{3.7 \times 10^{-17}} \cdot \left(\frac{0.3 \text{ m}}{L} \right) \quad [\text{N/Hz}^{1/2}]$$

要求値・パラメータの概要(1)

試験マス懸架

- * 温度 4K, Q値 $> 3 \times 10^7$
- * 共振周波数 < 2 mHz
→ シリコンファイバー
- * 熱伝導率 ???

試験マス変動測定

- * 回転温度 : $\theta < 1 \times 10^{-15}$ m/Hz^{1/2}
- * 並進変動 : $x < 1 \times 10^{-11}$ m/Hz^{1/2}
- * 光源パワー : ~ 10 W (or Cavity)
- * 光源強度雑音 : $\delta I/I = 10^{-6}$ Hz^{1/2}
- * 光源周波数雑音 : $\delta \nu = 50$ Hz/Hz^{1/2}

試験マス

- * 温度 4K, Q値 $> 10^2$
- * 長さ > 300 mm, 直径 > 30 mm
→ 質量 7.6kg (銅)
慣性効率 0.057 kg \cdot m²
- * 平面度 $< 10^{-7}$ (安全係数込)
- * 磁化率 0.086×10^{-6}

地面振動・防振 : ヘキサポッド能動防振

	回転変動 [rad/Hz ^{1/2}]	並進変動 [m/Hz ^{1/2}]
@0.1 Hz		
能動防振ステージ	$< 3 \times 10^{-7}$	1×10^{-8}
ダンピングマス	6.3×10^{-9}	1×10^{-8}
上段マス	2.5×10^{-12}	1×10^{-8}
試験マス	1×10^{-15}	$< 1 \times 10^{-11}$

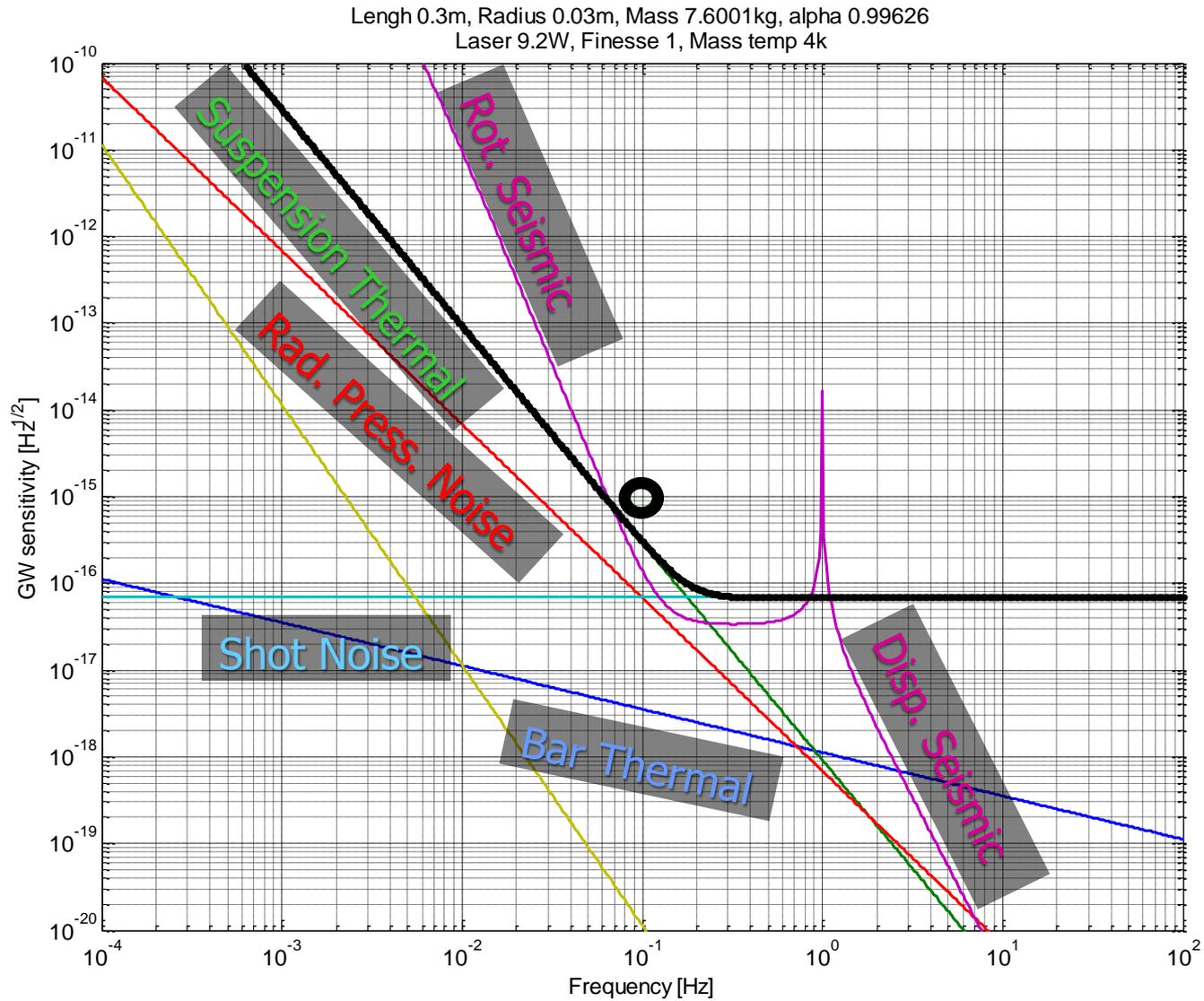
相対変動測定

要求値・パラメータの概要(2)

実験環境

- * 真空度 1×10^{-8} Pa
- * 温度変動 (熱輻射) 1×10^{-2} K/Hz^{1/2}
- * 静磁場 (地磁気) : 5×10^{-5} T
- * 磁場変動 1×10^{-7} T/Hz^{1/2}
- 磁気シールド : 5.5桁

感度見積もり



主な雑音源

1. 原理的な雑音

* 光読み取り雑音

(Shot and Rad. Press. noises)

* 熱雑音

(Suspension, Bar, Mirror)

2. 外力雑音

* Magnetic coupling,

Thermal radiation, Residual Gas,...

3. 地面振動雑音

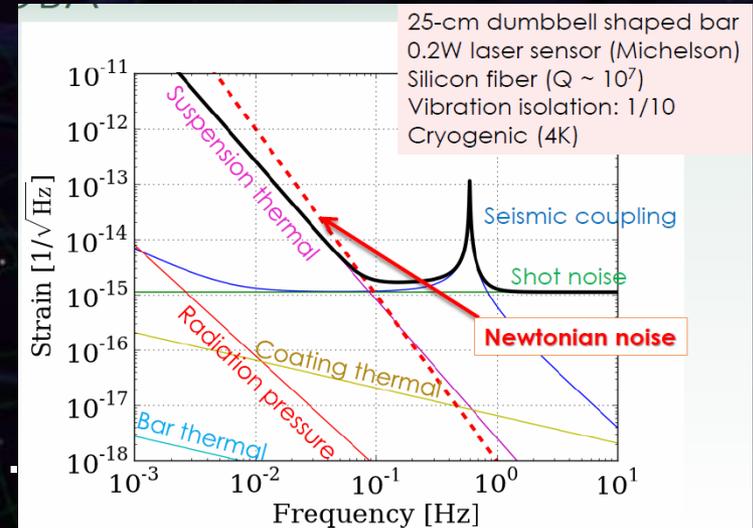
* 回転地面振動

* 変位振動からのカップリング

4. その他の雑音

* Vibration from cryogenic system, Actuator noises,...

By A.Shoda (2014)



1. 原理的な雑音

標準量子限界

標準量子限界 (SQL: Standard Quantum Limit)

散射雑音と量子輻射圧雑音が無相関のとき,
それらの和で決まる測定限界.

$$\delta\theta_{\text{SQL}} = \sqrt{\frac{2\hbar}{I\omega^2}}$$

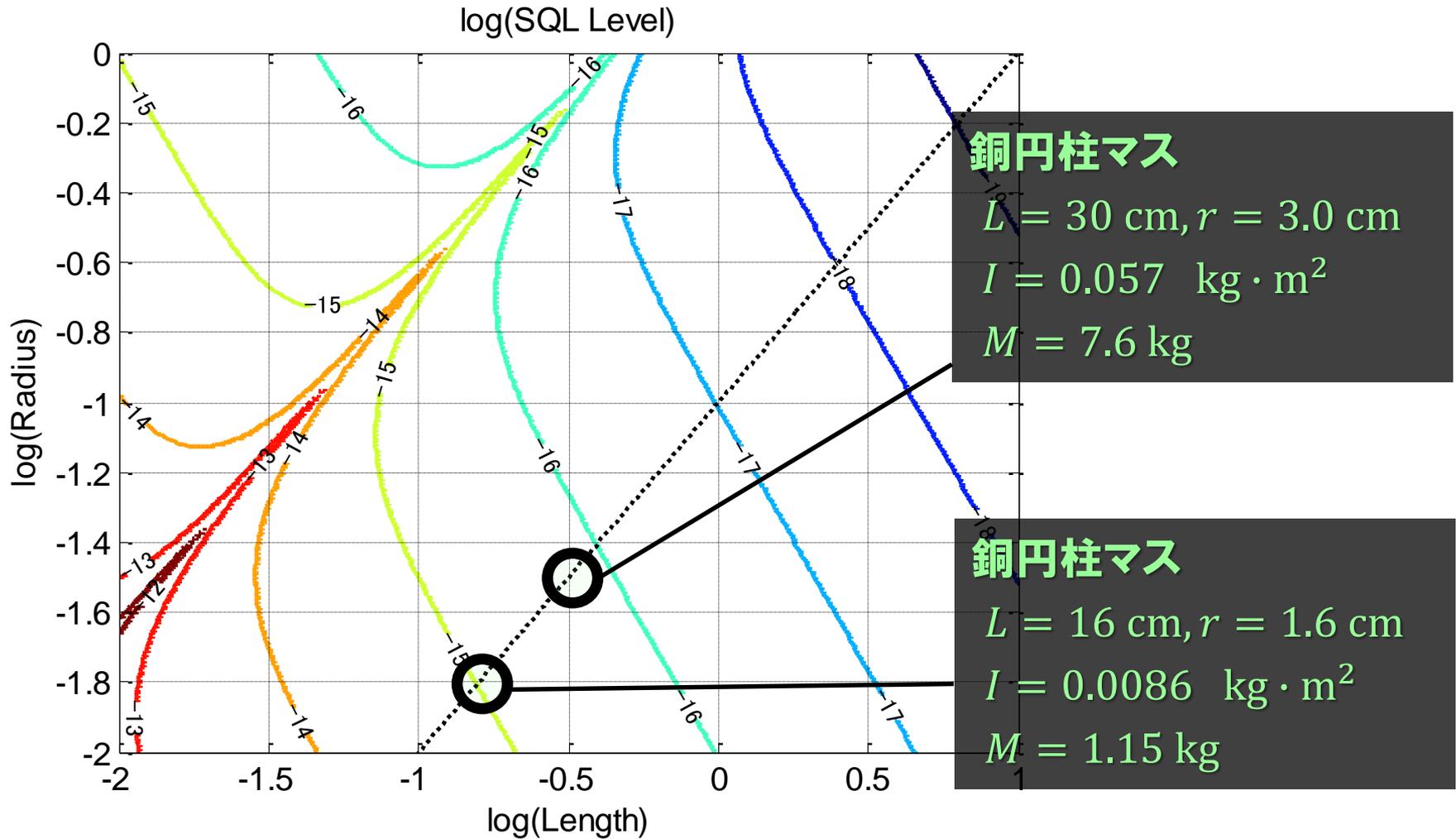
$$\left[\begin{array}{l} \text{棒状試験マス} : I = \frac{1}{12} ML^2 \\ \text{ダンベル状マス} : I = \frac{1}{4} ML^2 \end{array} \right.$$

→ 慣性モーメントで決まる.

• **要求値** $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$).

→ $I \geq 3.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

標準量子限界



散射雑音と輻射圧雑音

• 散射雑音 (Shot Noise)

$$\delta\theta_{\text{Shot}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{\pi P_0}} \quad [\text{rad/Hz}^{1/2}]$$

• 輻射圧雑音 (Radiation Pressure Noise)

$$\delta\theta_{\text{Rad}} = \frac{2L}{I \omega^2} \sqrt{\frac{\pi \hbar P_0}{c \lambda}} \quad [\text{rad/Hz}^{1/2}]$$

⇒ これらが一致 $P_0 = \frac{I \omega^2 c \lambda}{4\pi L^2} \quad [\text{W}]$

$f = 0.1 \text{ Hz}, L = 0.3 \text{ m}, I = 0.057 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ のとき,
 $P = 9.2 \text{ W}, \delta\theta_{\text{Shot}} = 6.8 \times 10^{-17} \text{ rad/Hz}^{1/2}$

※ マイケルソン干渉計での角度測定を想定.

棒状試験マスの熱雑音

試験マスの熱雑音 (Mass Thermal Noise)

試験マス内部の機械損失に起因.

端点での差動振動が変位読み取に影響する.



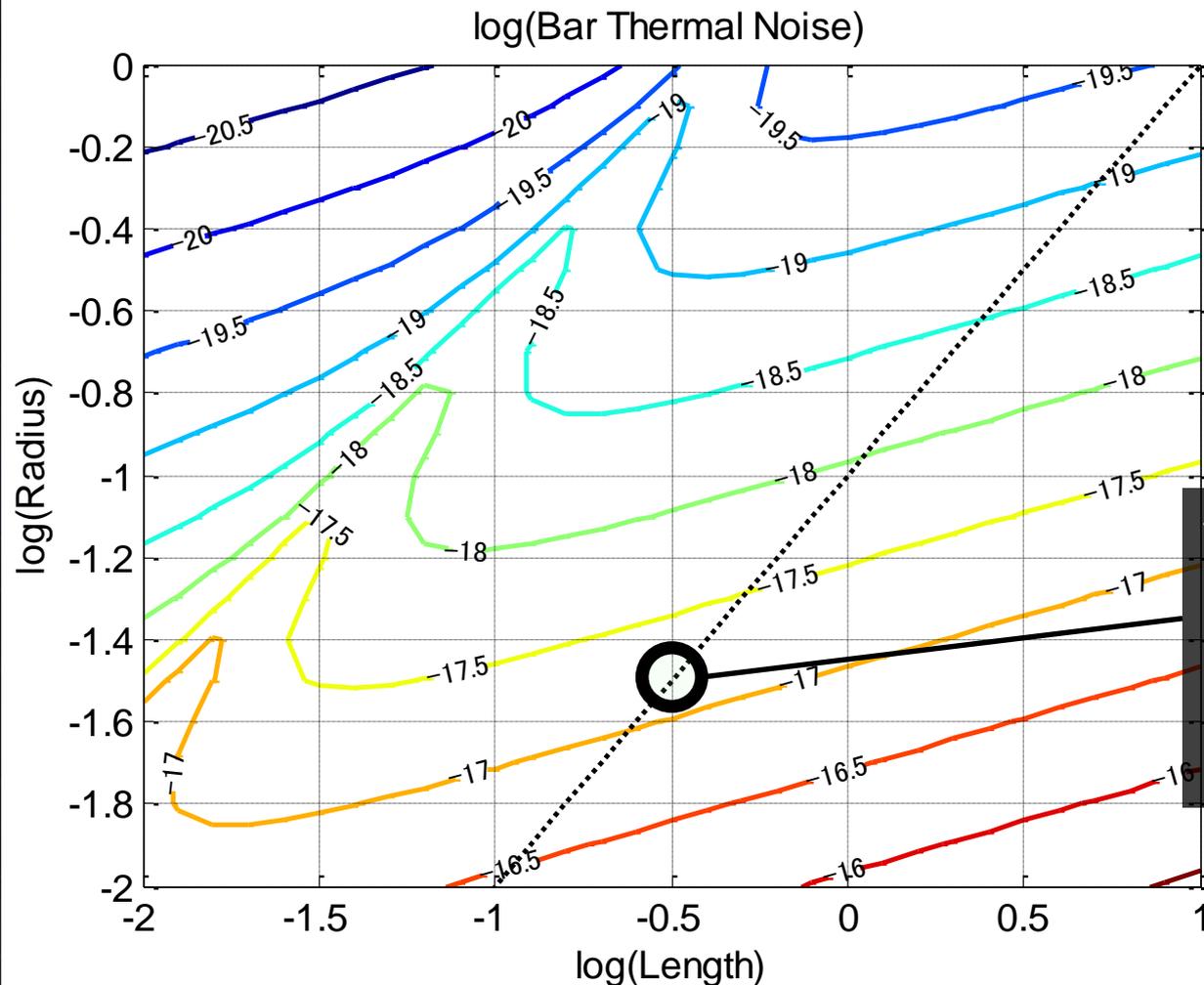
1つの共振モードあたり

$$\delta\theta_{\text{Bar}} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{4k_B T}{\omega} \frac{\phi}{\mu \omega_0^2}} \quad (\omega \ll \omega_0) \quad \left[\begin{array}{l} \text{換算質量} : \mu \\ \text{機械損失} : I\phi = 1/Q \end{array} \right]$$

• **要求値** $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$).

→ **低温銅** ($\phi = 10^{-6}, T = 4 \text{ K}$) なら問題ない.

試験マスの熱雑音



低温 銅を想定

$$\phi = 10^{-6}, T = 4 \text{ K}$$

銅円柱マス

$$L = 30 \text{ cm}, r = 3.0 \text{ cm}$$

$$I = 0.057 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M = 7.6 \text{ kg}$$

振り子の熱雑音

サスペンションの熱雑音 (Suspension Thermal Noise)

懸架ワイヤ内部の機械損失に起因.

$$\delta\theta_{\text{sus}} = \sqrt{\frac{4k_B T}{\omega} \frac{\omega_0^2 \phi}{I \omega^4}} \quad (\omega \gg \omega_0)$$

→ ワイヤ Q値, 共振周波数, 慣性モーメント に依存.

• **要求値** $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$).

→ 例: シリコンサスペンション, 銅円柱マス

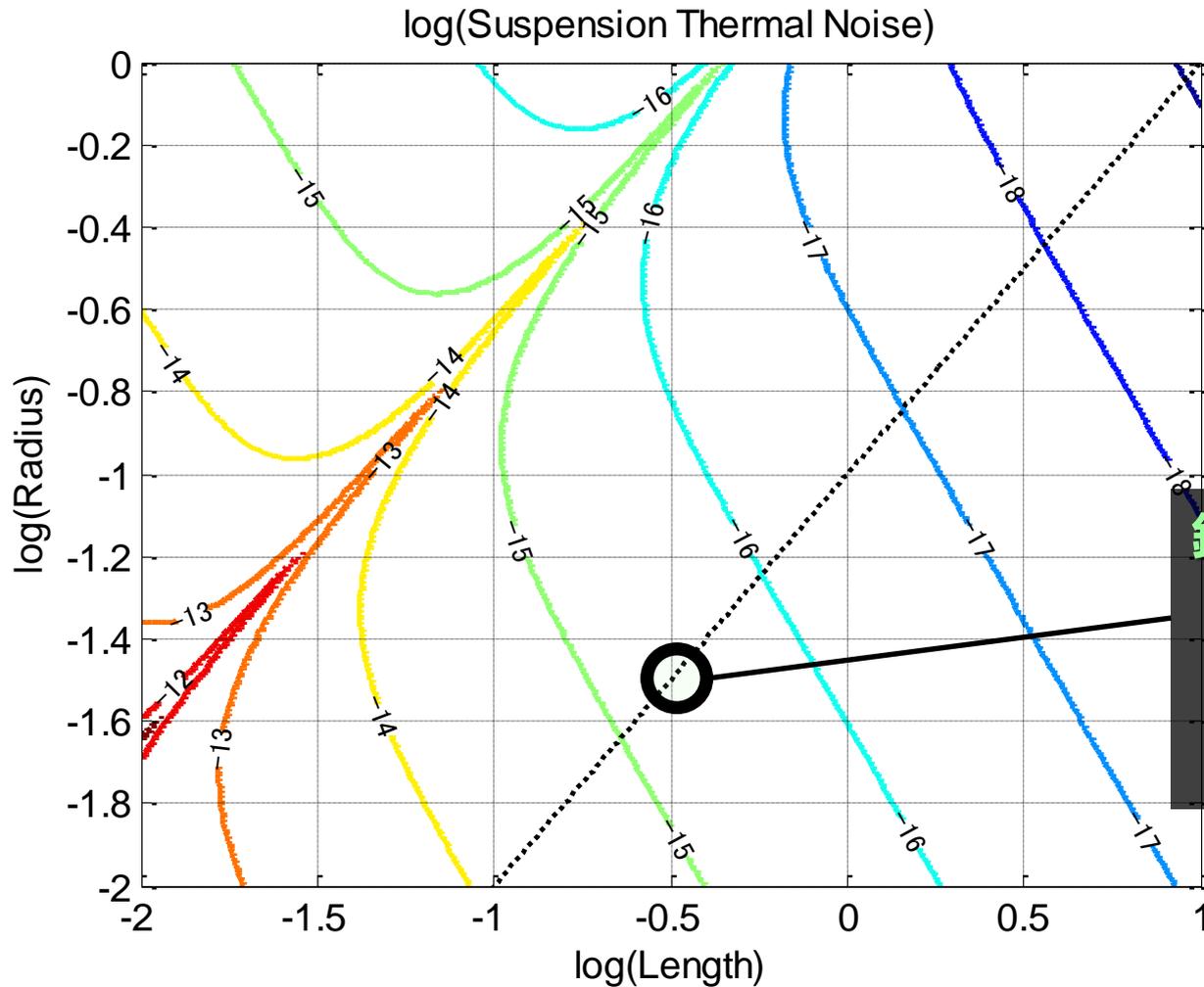
$$L = 30 \text{ cm}, \quad r = 3.0 \text{ cm}, \quad I = 0.057 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad M = 7.6 \text{ kg}$$

$$\phi = 3 \times 10^{-8}, \quad T = 4 \text{ K}, \quad f_0 = 2 \text{ mHz}$$

Bulk : Numata+, Phys. Lett. A, 284, 162 (2001)

Flexure : Reid+, Phys. Lett. A, 351, 205 (2006).

振り子の熱雑音



低温シリコン

サスペンションを想定

$$\phi = 3 \times 10^{-8},$$

$$T = 4 \text{ K}$$

$$f_0 = 2 \text{ mHz}$$

銅円柱マス

$$L = 30 \text{ cm}, r = 3.0 \text{ cm}$$

$$I = 0.057 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M = 7.6 \text{ kg}$$

2. 外力雑音

外部磁場変動の影響

外部磁場による磁化 + 磁場変動 → トルク

$$\delta\theta_{\text{mag}} = \frac{\chi B \delta B V}{\mu_0 I \omega^2} \cong \frac{12 \chi B \delta B}{\mu_0 \rho L^2 \omega^2} \text{ rad/Hz}^{1/2}$$

χ: 磁化率, ρ: 密度, μ₀: 真空透磁率
地磁気: B = 5 × 10⁻⁵ T,
磁場変動: δB = 1 × 10⁻⁷ T/Hz^{1/2}



• **要求値** $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$).

→ $L = 30 \text{ cm}$ のとき、 $\chi/\rho < 3.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{kg}$

[シリコン: $\chi/\rho = 1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$

銅: $\chi/\rho = 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$]

→ 銅の場合でも約3.5(+2)桁の磁気シールド・キャンセルが必要。

主な材質の物性値

	Q-factor	Young's modulus	Density ρ	Volume Mag. Susceptibility χ	Mass Mag. Susceptibility
Aluminum	10^5	72 GPa	2,700 kg/m ³	20.6×10^{-6}	0.61×10^{-6}
Sapphire	10^7	335 GPa	3,970 kg/m ³	$??? \times 10^{-6}$	$??? \times 10^{-6}$
Silica/glass	10^6	---- GPa	2,500 kg/m ³	-13.2×10^{-6}	-0.42×10^{-6}
Silicon	10^8	185 GPa	2,329 kg/m ³	$3,219 \times 10^{-6}$	110×10^{-6}
Copper	----	110 GPa	8,960 kg/m ³	9.68×10^{-6}	-0.086×10^{-6}
Titanium	----	--- GPa	4,500 kg/m ³	180×10^{-6}	3.18×10^{-6}
Tungsten	----	--- GPa	19,300 kg/m ³	77.6×10^{-6}	0.32×10^{-6}
Platinum	----	--- GPa	21,500 kg/m ³	264×10^{-6}	0.98×10^{-6}
Gold	----	--- GPa	19,320 kg/m ³	-34.5×10^{-6}	-0.14×10^{-6}
Niobium	----	103 GPa	8,560 kg/m ³	236×10^{-6}	2.20×10^{-6}

[cm³/g]

外部磁場変動の影響

・超伝導磁気シールド

* 0.2Hzで $\frac{1}{3 \times 10^6}$ の遮蔽効果.

* 鉛を添加したビスマス系セラミック

高温超伝導体 $\text{Bi}_x\text{Pb}_{(2-x)}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$

* 臨界温度 $\sim 100\text{K}$

* シールド 厚さ 1mm.

・磁場の差引き

* 外部磁場変動を測定 \rightarrow 信号から差し引く.

* 磁力計感度 $< 1\text{nT}/\text{Hz}^{1/2}$.

・試験マスの磁化率をキャンセルする.

* 常磁性体と反磁性体を組み合わせる (Au-Pt, Al-Sn, Cu-Al).

* 合金である必要はない.



図1 幕張メッセで動作中のモバイル装置



図2 脳磁界計測の全体図

太田浩, 情報通信研究機構季報Vol.50 (2004)

残留気体変動の影響

残留気体分子の衝突による熱雑音

$$\delta\theta_{\text{trad}} = \frac{1}{I\omega^2} \left(\frac{8}{3} aPL \right)^{1/2} (3k_B T m_m)^{1/4} \text{ rad/Hz}^{1/2}$$

a : 試験マスの側面積, P : 圧力,
 m_m : 気体分子の質量 (水素分子 3.3×10^{-27} kg)

• **要求値** $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$).

→ $L = 30 \text{ cm}$, $T = 4 \text{ K}$ のとき、 $P < 1.4 \times 10^{-8} \text{ Pa}$

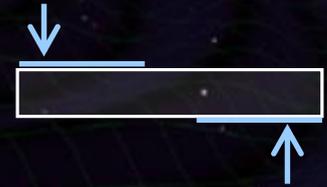
⇒ **良い真空が必要.**

試験マス形状の工夫ができる可能性?

熱輻射変動の影響

試験マス周辺からの熱輻射 ($I = \sigma T^4$ W/m²) の変動.
もっとも大きな相関を持った場合.

$$\delta\theta_{\text{trad}} = \frac{1}{I \omega^2} \frac{4 \sigma T_p^3 a L}{c} \delta T_d \quad \text{rad/Hz}^{1/2}$$



[a : 試験マスの側面積, σ : ステファン-ボルツマン定数,
 T_p : 温度 [K], δT_d : 温度変動 [K/Hz^{1/2}]

• **要求値** $h \leq 10^{-15}$ Hz^{-1/2} ($f = 0.1$ Hz) .

→ $L = 30$ cm, $T = 4$ K のとき、 $\delta T_d = 1.1 \times 10^{-2}$ K/Hz^{1/2}

⇨ 差動変動しなければ良い → 熱伝導の良い材質で囲む.

3. 地面振動

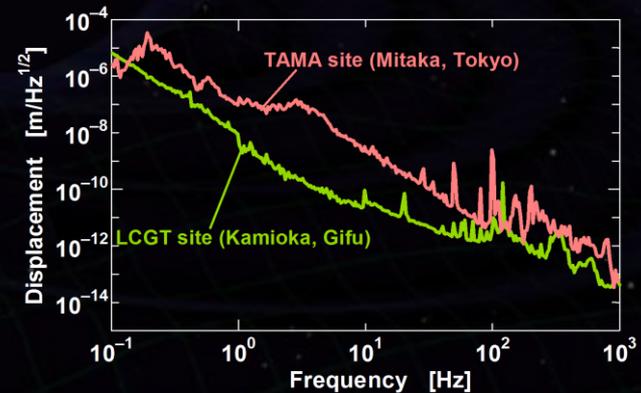
地面振動の影響

地面振動の回転成分 $\rightarrow 0.01 \text{ rad/m}$ とする.

多段ねじれ振りで防振される

$$\delta\theta_s \cong \left(\frac{f_0}{f}\right)^{2n} \delta\theta_{\text{seis}}$$

[n : 振り子段数]



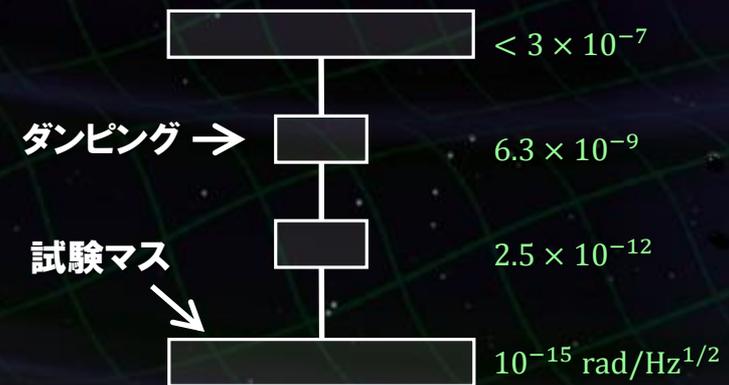
• 要求値 $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$).

7桁の防振が必要.

2段振り子 $\rightarrow f_0 = 1.8 \text{ mHz}$

3段振り子 $\rightarrow f_0 = 6.8 \text{ mHz}$

$\Rightarrow f_0 = 2 \text{ mHz}$ の3段振り子
(2段 + 1段ダンピング)



試験マス並進変動の影響

試験マス並進変動からのカップリング

- * 鏡の傾き → 並進変動が回転変動として読み取られてしまう影響.
- * 0.1Hzでは並進の防振が困難.



$$\delta\theta_d = \Delta\theta \frac{\delta x}{L} \quad \text{rad/Hz}^{1/2} \quad [\Delta\theta: \text{鏡の傾き}, \delta x: \text{並進変動}]$$

• **要求値** $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$).

→ 鏡の平行度 $\Delta\theta = 10^{-7} \text{ rad}$,

並進変動 $\delta x = 10^{-8} \text{ m/Hz}^{1/2}$

[長さ 30cm $\lambda/30$ の研磨 → $\Delta\theta = 10^{-7}$]

試験マス並進変動の影響

重心と懸架点のずれによるカップリング

懸架点の並進変動

→ 並進変動が回転変動

$$I\ddot{\theta} + \gamma\dot{\theta} + \kappa\theta = \Delta x M \ddot{x}$$

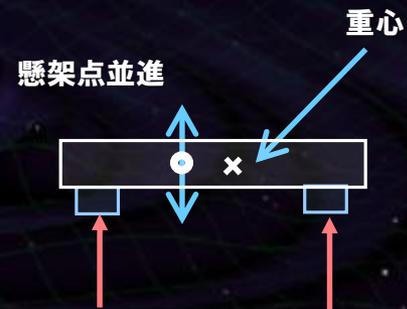
$$\Rightarrow \tilde{\theta} = \frac{M}{I} \Delta x \cdot \tilde{x} = \frac{12}{L^2} \Delta x \cdot \tilde{x} \quad \text{rad/Hz}^{1/2}$$

• **要求値** $h \leq 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ ($f = 0.1 \text{ Hz}$) .

→ **試験マス長さ** 30 cm のとき、

並進変動 $\tilde{x} = 10^{-8} \text{ m/Hz}^{1/2}$

懸架点のずれ $\Delta x = \underline{7.5 \times 10^{-10} \text{ m}}$



試験マス並進変動の影響

・並進からのカップリングの低減

* 重心位置の調整.

試験マスの傾き

$\Delta\theta = \Delta x / \Delta h$ を調整.

→ $\Delta\theta = 10^{-5}$, $\Delta h = 10^{-4}$

は可能だろう (Pitch 共振周波数 18mHz).

※ ワイヤの弾性を考量する必要がある.

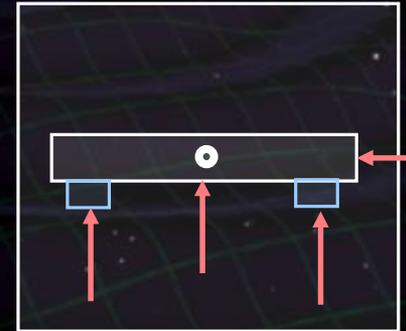


並進変動の影響低減

- 並進からのカップリング低減

- * 鏡面の平行度 $< 10^{-5}$

- * 懸架点のずれ $< 10^{-7}$ m



- * 並進変動の測定をし, データから差し引く.

$$\delta x = \sim 10^{-11} \text{ m/Hz}^{1/2}$$

4. その他の雑音

光源の強度雑音

・光源の古典強度雑音

マイケルソン干渉計が完全に対称の場合は影響ない。
動作点のずれ(RMS)とカップルして読み取り雑音となる。

$$\delta\theta_{\text{int}} = \frac{\delta I}{I} \Delta\theta_{\text{rms}} \quad [\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}]$$

⇒ 強度安定化と干渉計制御への要求

$$\frac{\delta I}{I} \leq 1 \times 10^{-6} \quad \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$$
$$\Delta\theta_{\text{rms}} \leq 1 \times 10^{-9} \quad \text{rad}$$

光源の周波数雑音

・光源の周波数雑音

マイケルソン干渉計の腕の長さの非対称性とカップルしてする影響.

$$\delta\theta_{\text{freq}} = \frac{\delta\nu}{\nu} \frac{\Delta x}{L} \quad [\text{rad/Hz}^{1/2}]$$

⇒ 周波数安定化と干渉計非対称性への要求

$$\delta\nu \leq 50 \quad \text{Hz/Hz}^{1/2} \quad (\lambda = 1550 \text{ nm})$$

$$\Delta x \leq 1 \times 10^{-3} \quad \text{m}$$

要求値と雑音源のまとめ

要求値・パラメータの概要(1)

試験マス懸架

- * 温度 4K, Q値 $> 3 \times 10^7$
- * 共振周波数 < 2 mHz
→ シリコンファイバー
- * 熱伝導率 ???

試験マス変動測定

- * 回転温度 : $\theta < 1 \times 10^{-15}$ m/Hz^{1/2}
- * 並進変動 : $x < 1 \times 10^{-11}$ m/Hz^{1/2}
- * 光源パワー : 0.1~10W (or Cavity)
- * 光源強度雑音 : $\delta I/I = 10^{-6}$ Hz^{1/2}
- * 光源周波数雑音 : $\delta \nu = 50$ Hz/Hz^{1/2}

試験マス

- * 温度 4K, Q値 $> 10^2$
- * 長さ > 300 mm, 直径 > 30 mm
→ 質量 7.6kg (銅)
慣性効率 0.057 kg・m²
- * 平面度 $< 10^{-7}$ (安全係数込)
- * 磁化率 0.086×10^{-6}

地面振動・防振 : ヘキサポッド能動防振

	回転変動 @0.1 Hz [rad/Hz ^{1/2}]	並進変動 [m/Hz ^{1/2}]
能動防振ステージ	$< 3 \times 10^{-7}$	1×10^{-8}
ダンピングマス	6.3×10^{-9}	1×10^{-8}
上段マス	2.5×10^{-12}	1×10^{-8}
試験マス	1×10^{-15}	$< 1 \times 10^{-11}$

相対変動測定

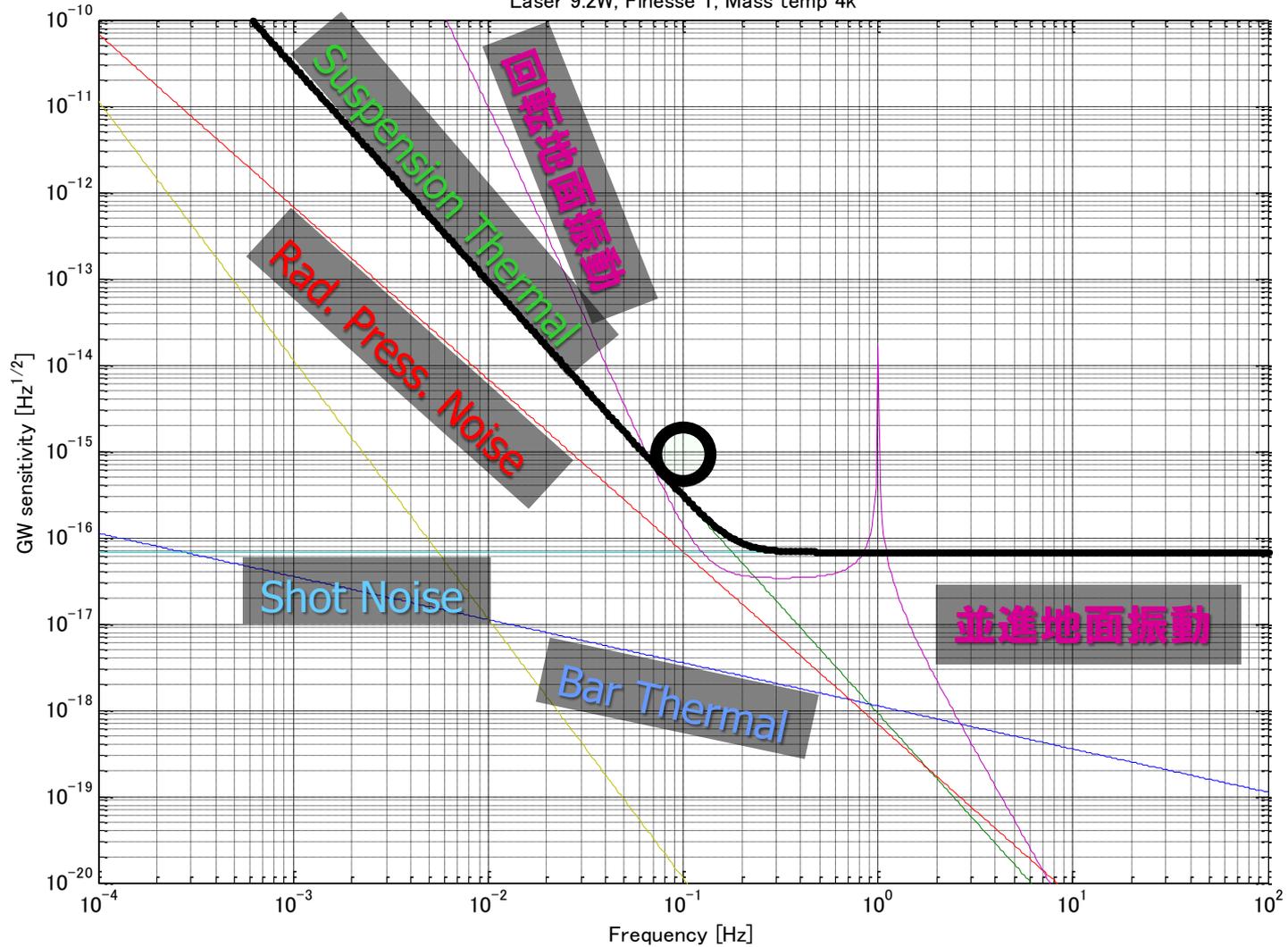
要求値・パラメータの概要(2)

実験環境

- * 真空度 1×10^{-8} Pa
- * 温度変動 (熱輻射) 1×10^{-2} K/Hz^{1/2}
- * 静磁場 (地磁気) : 5×10^{-5} T
- * 磁場変動 1×10^{-7} T/Hz^{1/2}
- 磁気シールド : 5.5桁

感度見積もり

Lengh 0.3m, Radius 0.03m, Mass 7.6001kg, alpha 0.99626
Laser 9.2W, Finesse 1, Mass temp 4k



検討が足りていない事項

- **読み取りの構成**

- * レファレンス部の回転変動も問題となる。

- **アクチュエータ**

- * 制御するかどうか。

- * コイル-マグネットアクチュエータは使用できない。

- **低温との整合性**

- * 光の導入。

- * 使用できるコンポーネントのサーベイ。

開発要素と実験計画

Phase-III TOBAへ向けた開発要素

- シリコンファイバの特性評価.
 - * 入手性, Q値測定, 耐荷重評価.
- 並進変動からのカップリング低減
 - * 平面研磨, 相対並進制御, 重心調整.
- 低温設備, 干渉計構成
 - * 冷却設備の整備, 低温干渉計.
- 磁場雑音低減
 - * 磁気シールド, 磁気特性評価.
- アクチュエータ開発
 - * 永久磁石を使用しないもの:
静電型, 誘電型, 光輻射圧.

やってみると良さそうな小中実験

(1) 熱雑音で制限されたねじれ振り子開発.

→ 光学浮上, オプトメカ測定, 各種雑音評価など.

* 1段ねじれ振り子 + プラットフォームも懸架.

* 干渉計でReadout. (PRMI?)

* 並進カップリングを低減・評価.

* 上段懸架部もあると良い.

* 常温・試験マス形状も工夫してよい.

(1') 感度の良い常温TOBA

* 常温でできることを全てやる.

→ $h \sim 10^{-12} \text{ Hz}^{-1/2}$ 程度は実現可能.

やってみると良さそうな小中実験

(2) 低温干渉計開発.

→ 低周波数での最高変位感度など.

* 固定鏡, もしくは懸架鏡干渉計

* 何らかのアクチュエータで制御.

(3) シリコン等の材質評価.

→ Q値の高い振り子の実現.

* 温度依存性などの性質も調べられると良い.

(4) 超伝導を用いた何かの開発

* アクチュエータ, センサ, シールド,

やってみると良さそうな小中実験

(5) 低温ねじれ振り子

- * 低温での熱雑音低減効果, 非平衡系熱雑音?, 波束収縮heating?,

(6) DECIGO関係.

- * 航空機実験装置の開発.
- * 相乗りミッション用システム開発.
- * 力の雑音の測定.

(7) 地震の即時検出.

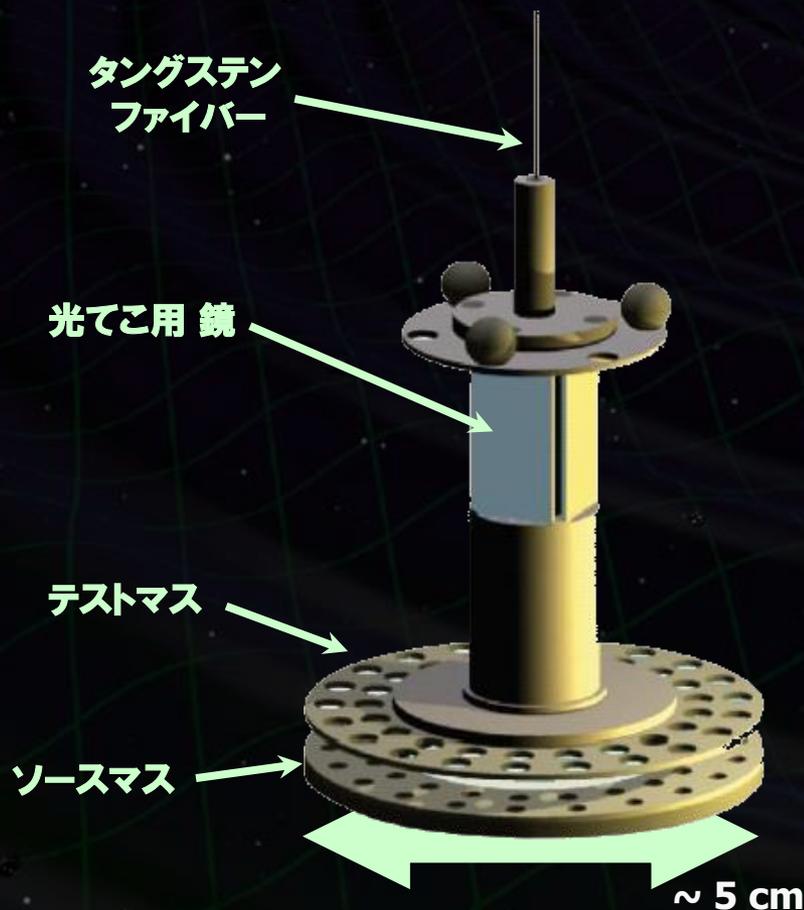
- * 2011年3月11日のTOBAデータ解析.
- * 地震研との共同研究.

おしまい

近年の検証実験

ワシントン大 グループ (Eot-Wash group)

D. J. Kapner et al., Phys. Rev. Lett 98 (2007) 021101



From Web Page:
PHYSICS DIVISION
Lawrence Berkeley National Laboratory

Challenging our Understanding of Gravity



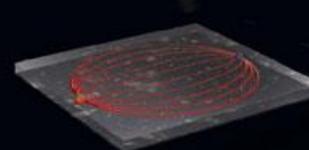
Tabletop Experiments

Some paradoxes of particle physics can be investigated in surprisingly direct ways. Measuring the force of gravity extremely carefully with a tabletop apparatus could reveal the existence of hidden dimensions.

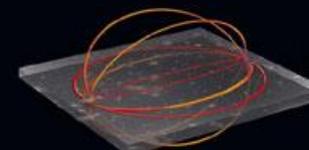
The astonishing possibility is that, at very short distances, gravity may no longer follow Newton's Law (force of gravity varies inversely with distance squared). The actual strength of gravity at less than 1/32 inch (0.8 mm) is being tested using exquisitely sensitive instruments, such as the precision torsion pendulum at the left. A deviation from Newton's Law would be evidence for hidden dimensions.

Gravity and Hidden Dimensions?

Gravity is so weak that a tiny magnet can hold up a paper clip against the gravity of the entire Earth. Perhaps gravity is weak because its effect is spread out over more than three space dimensions, while stronger forces like magnetism are confined to just the three dimensions we perceive. Notice that the field lines below are more spread out in three dimensions than in two dimensions. The same would be true comparing four dimensions to three dimensions.



ELECTROMAGNETISM!



GRAVITY?

A tiny magnet exerts greater force than Earth's gravity.

General relativity tells us that gravity warps all of space and is therefore sensitive to all the dimensions of space.



テストマス ソースマス

PHYSICAL REVIEW D 70, 042004 (2004)

タングステン ファイバー

Q~3000
長さ 80cm
太さ 17-22 μ m

キャリブレーションマス

光てこ用鏡

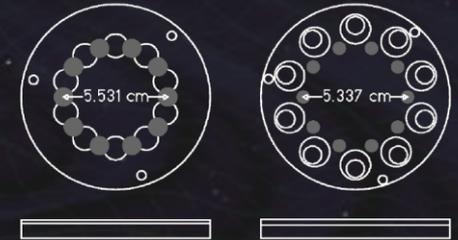
シールド

TM-AT間
厚さ10 μ m
BeCu + Au coat

間隔

55 μ m -
9.53mm

穴の配置
→ Newton
成分をキャンセル

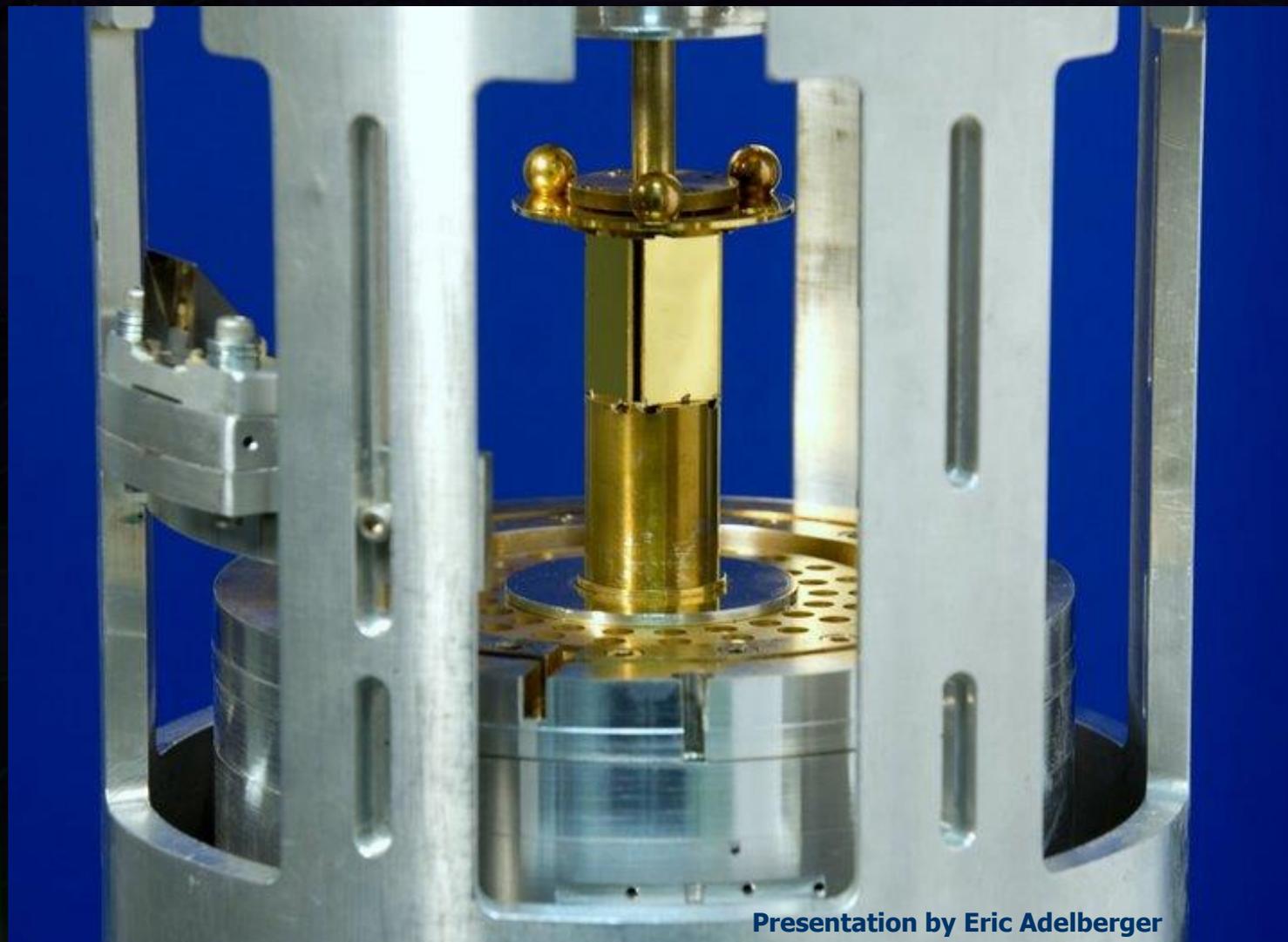


テストマス

モリブデン製ディスク
厚さ 0.997mm
21x2 個の穴
径 4.767mm
m~40g, I~128 g cm²

ソースマス (アトラクター)

モリブデン製ディスク
厚さ 0.997mm
21x2 個の穴
(径 3.178 mm)
タンタル製ディスク
21個の穴
(径 6.352mm)



Presentation by Eric Adelberger

- ϕ -top – (x,y,z, ϕ) stages to control position of fiber suspension

- vacuum vessel; turbo pumped, $\sim 10^{-6}$ torr

- 3 leveling legs, ~ 3 mrad/turn

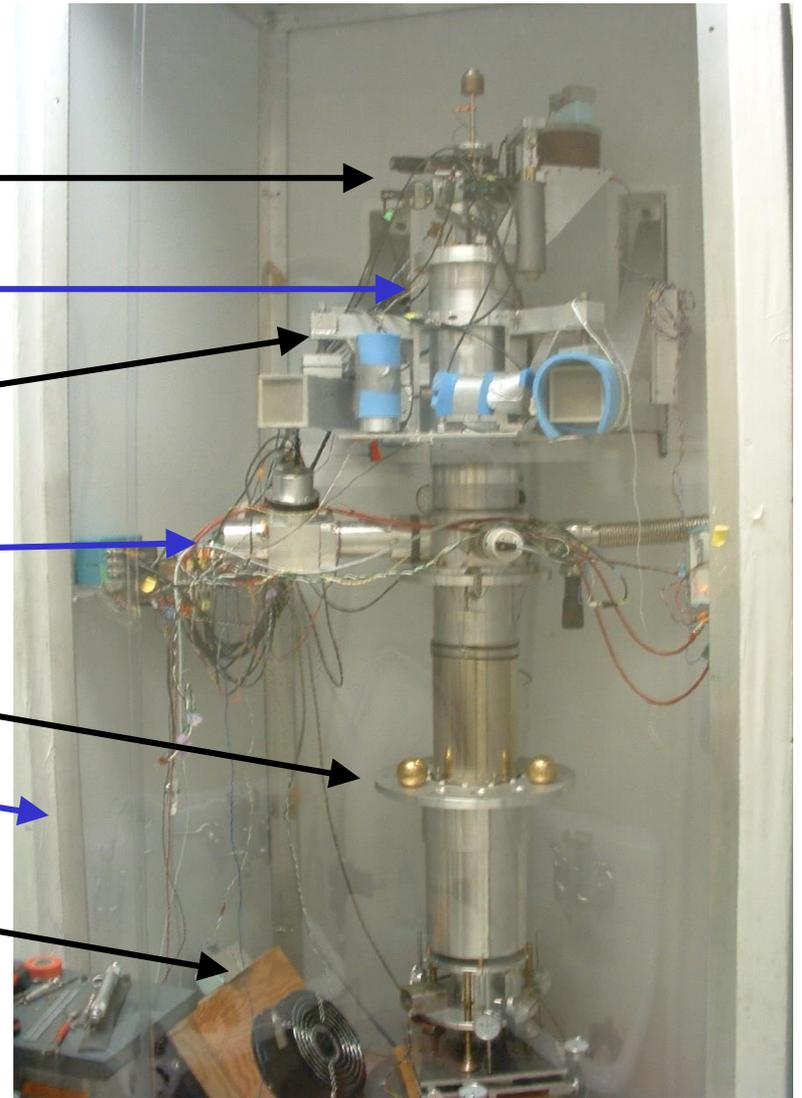
- Autocollimator – laser and detector to track pendulum twist

- calibration turntable

- Thermal enclosure

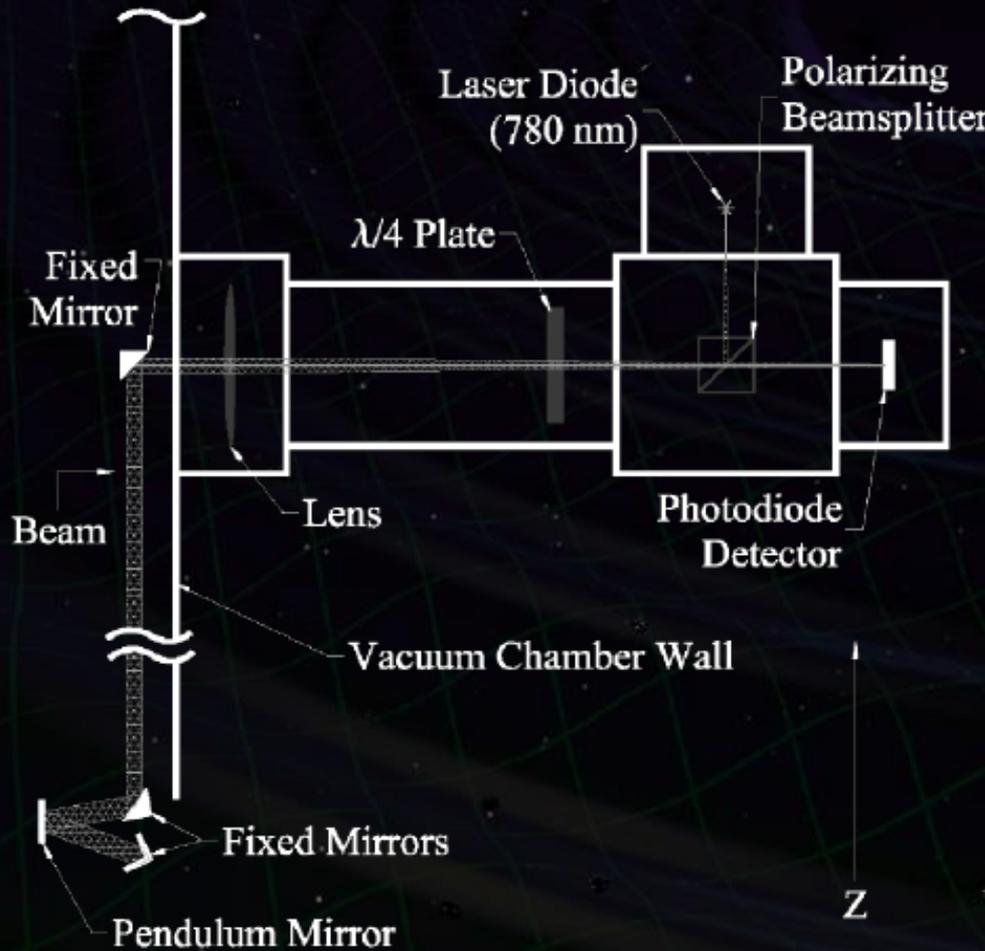
- radiator

- All within a cleanroom



Presentation by Eric Adelberger

光てこ



折り返しによって
並進変動の影響を
受けにくくしている

141Hzでチョッピング
→ ロックインアンプで検波

雑音スペクトル

