

LCGT計画 と 低温レーザー干渉計技術

発表者
東京大学宇宙線研究所
三代木伸二
&
LCGT Collaorators

東大宇宙線研・東大理学部・国立天文台・東大新領域・京都大・大阪大
KEK・大阪市大・電通大・東大地震研・東北大・新潟大

重力波物理学研究会
2003年1月30日
京都大学 基礎研究所

地上最後？の重力波アンテナ計画

現在進行中の計画
(LISA以外これらの目指す感度では観測は難しい)



将来の計画
(年数回の観測を目指す)

Advanced LIGO (アメリカ)

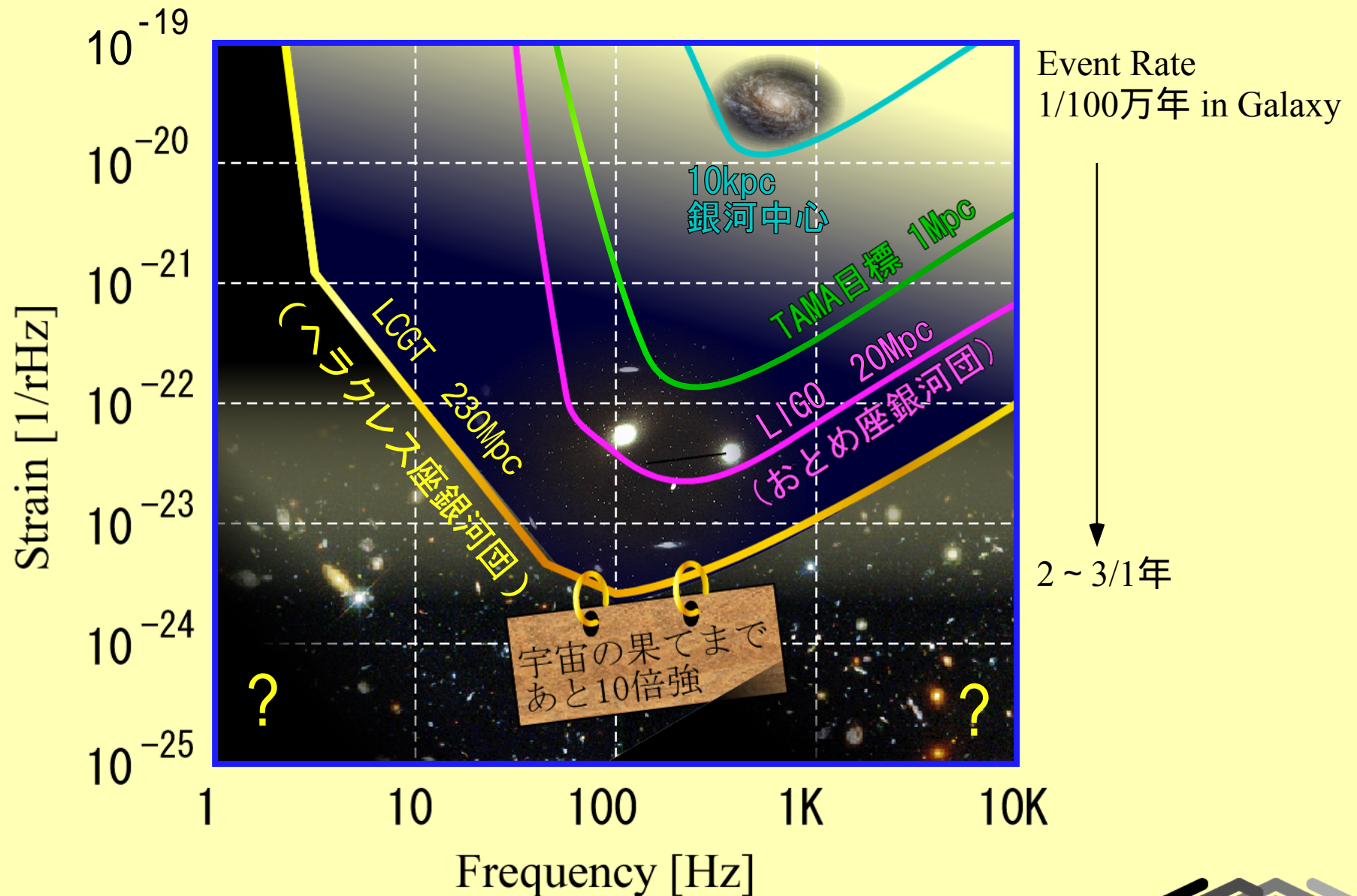
EURO (欧州)

LCGT (日本)

DECIGO (日本)

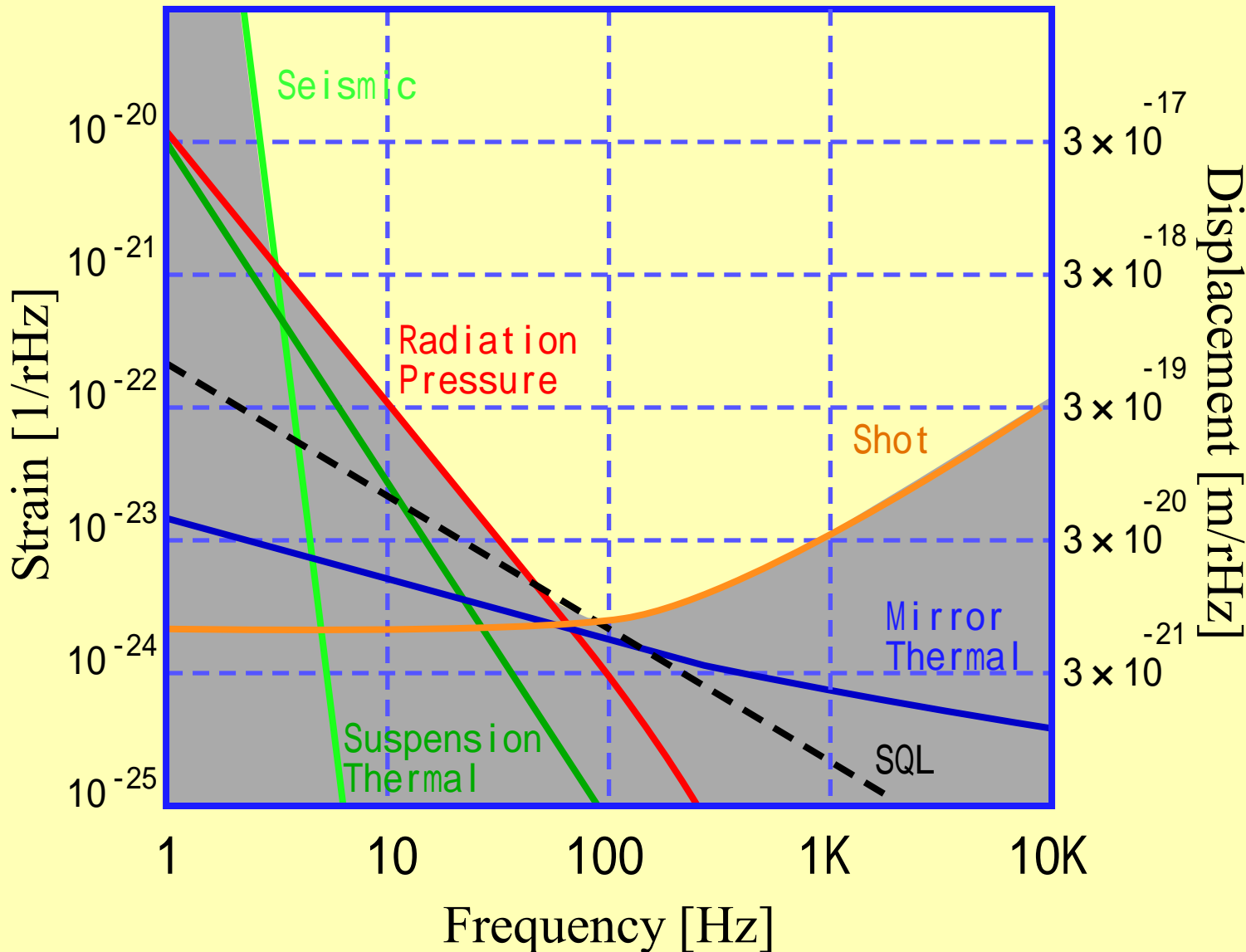


1.4-1.4M_☉連星中性子星合体が SN=10で見える距離と感度曲線



地上レーザー干渉計の究極感度

量子雑音で決まる感度



LCGTの場合

- Shot Noise
 - 400kW Cavity Power
- Radiation Pressure Noise
 - 400kW Cavity Power
 - 50kg の鏡
- Seismic Noise
 - 低周波防振装置
- Thermal Noise
 - 低温鏡 (20K)
- SQL
 - 鏡を重くする
 - スクイーミング?



LCGT計画 Design Working Group

■ LCGT Design Working Group

- 2001 : 各テーマごとに現状と問題点の洗い出し
- 2002 : 特にChallengingなテーマに関して実現性をつめる
- 2003 : 具体的なデザイン作成

LCGT Design 項目 (総括: 黒田・大橋)

- 巻頭檄文 (中村)
- 感度デザイン (山元)
- 干渉計構成 (安東)
- レーザー (三尾・武者)
- 入射光学系・安定化 (長野)
- ハイパワー用光学部品 (森脇)
- 鏡の研磨・コーティング (大橋)
- 低温技術
 - サファイア (都丸)
 - 冷却機構 (内山)
 - 懸架 (三代木)
- 低周波防振 (高森)
- Suspension Point Interferometer (麻生)
- Resonant Sideband Extraction, Squeezing (川村・宗宮)
- 環境 (佐藤)
- 宇宙線の影響 (常定)
- 真空 (高橋)
- Data Acquisition (辰巳)
- 重力波源・理論・解析戦略 (田越・神田)



LCGT計画の特徴

(他の計画との目標感度実現のための戦略の違い)

神岡鉱山内(山頂深度1000m)に設置

- 低振動・安定環境による観測装置としての安定動作
- 10Hz ~ 100Hzの感度は0.1H付近の静かさに依存しがち

Fabry-Perot 共振器基線長は3km

- RSE技術と光Recycling技術を投入したFabry-Perot Michelson型レーザー干渉計方式

鏡の低温化による熱雑音の低減

- 100Hz付近を制限する熱雑音(Thermo Elastic Noise)を低減

2台の干渉計(同じ場所)でVeto

SPI方式による副干渉計の導入

- 熱伝導系の防振と重力波アンテナとしての副干渉計



LCGTの目標感度の最適化

目標

1.4-1.4M連星中性子星の合体によるChirp重力波をSN=10で検出できる距離を最長にできる感度形状を求める

初期条件

- 干渉計に入射できるレーザーパワーの上限は100 [W]とする。
- 鏡の重量は50 [kg]
- 地面振動は信号積分範囲で十分低減されており影響しないとする。
- 熱雑音は、既定のロス等によりすでに決定されている。
- 鏡での許容発熱量は1W

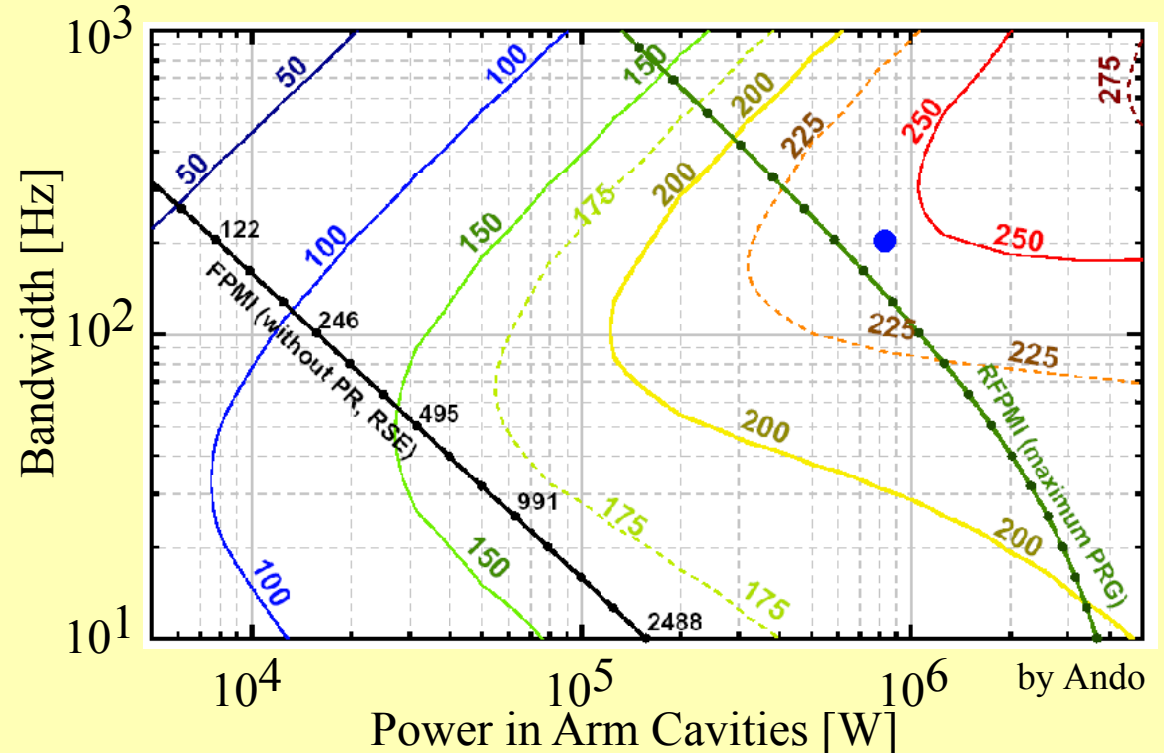
求め方

残る光の雑音（Shot雑音と輻射圧雑音）を干渉計の腕内レーザーパワーと帯域をパラメーターとして設定しSN=10となる重力波源への等距離曲線をもとめる。低温鏡が冷やせる範囲で最小パワーで最大感度をもてる条件を模索する。

決定値

800[kW] Power, 200[Hz] Bandwidth.

SN=10を達成できる腕内パワーと帯域と重力波発生源までの距離



2台の干渉計(同じ場所?)でVeto

SN=10でなんか信号が出たけど、それを重力波信号だ！
というにはどうするの？

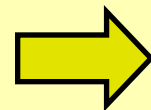
TAMA - LISMの同時観測でVeto解析は確立中。
- 但し、感度が同レベルでないという意味がない。

2台の観測装置で年間1イベントを観測するバックグラウンド
の要求値

有為さ	許容バックグラウンド数[個/年]	1台の許容頻度[個/sec]
3 σ	2.7×10^{-3}	3.6×10^{-4}
4 σ	6.3×10^{-5}	4.6×10^{-5}
5 σ	5.7×10^{-7}	4.4×10^{-6}

by Kanda

- 検出器Aのバックグラウンド f_A [個/sec]
- 検出器Bのバックグラウンド f_B [個/sec]
- AとBのイベント間隔 Δt 以下を同時とする。 ($\Delta t \sim 1\text{msec}$)



$$\text{Accidental Coincidence} = f_A f_B \Delta t$$

$$\langle N_{BK} \rangle = T f_A f_B \Delta t$$

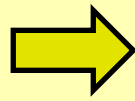
T: 観測時間



神岡鉱山内の静粛・安定な環境(1)

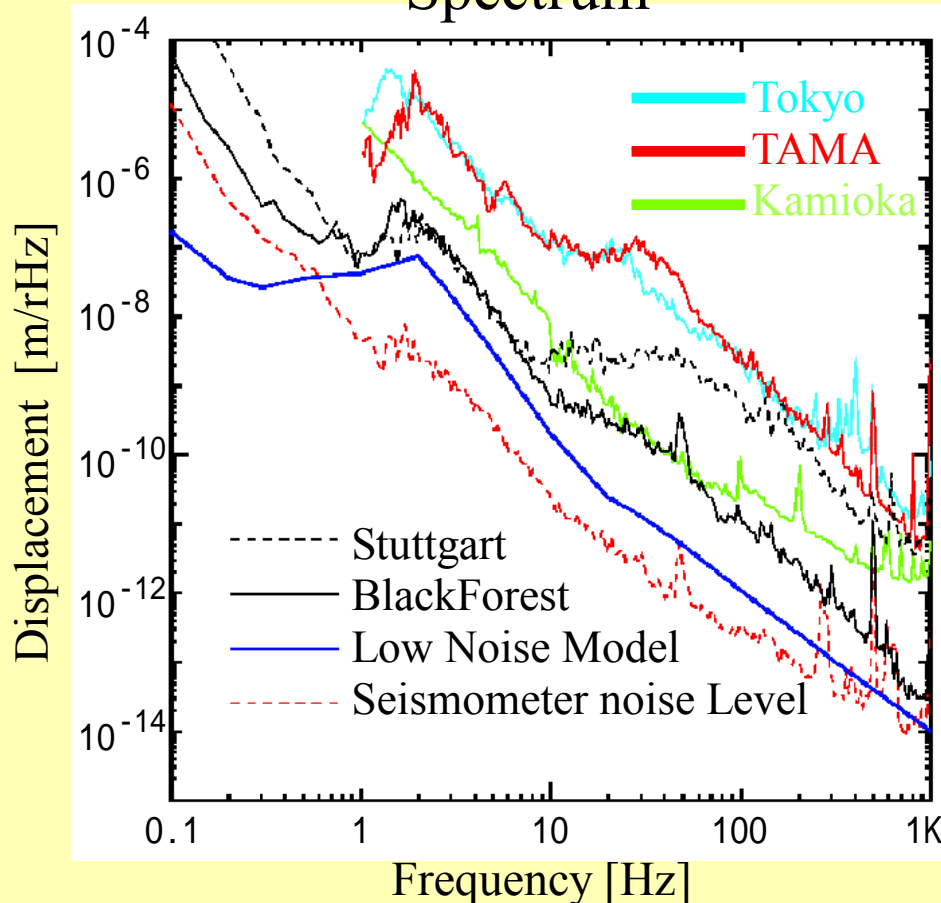
地面振動が小さい

- TAMAサイトの1/100
- LIGOサイト(地表)よりも1/10静かな領域がある

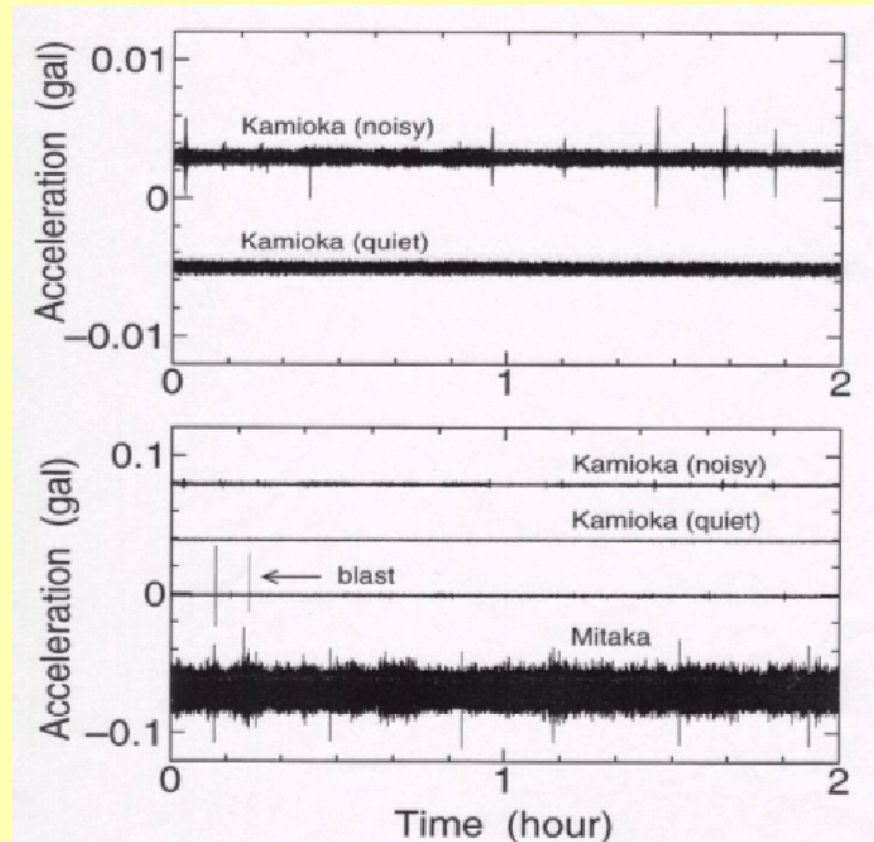


低周波防振系・アライメント系の制御雑音を避けられる

Spectrum



Acceleration (Time Domain)

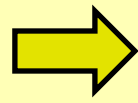


byAraya

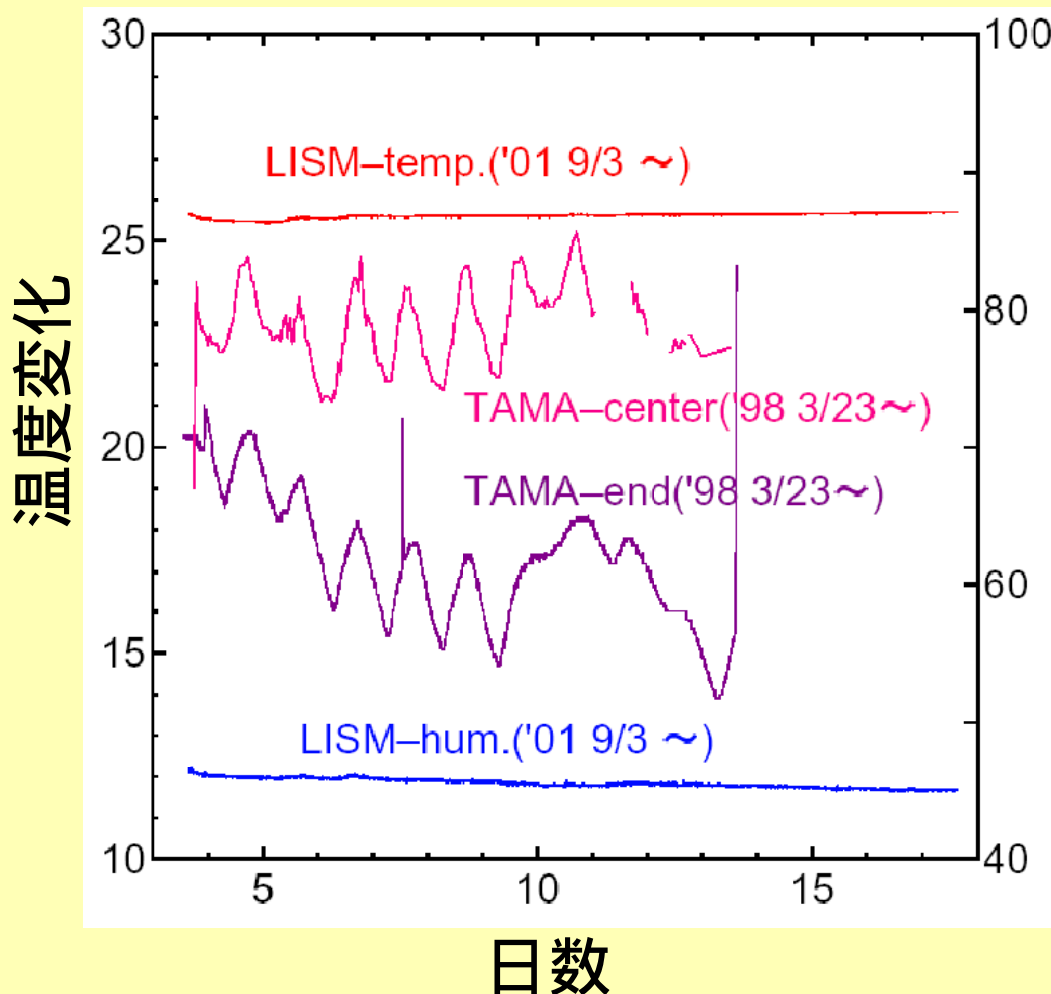


神岡鉱山内の静粛・安定な環境(2)

温度変化が小さい
岩盤が固い



干渉計のドリフトが小さいので
制御系のダイナミックレンジを下げられる



自然放置で
 ± 0.1 度/Dayの変化しかない
(地上は10倍以上大きい)

自然放置で
 $\pm 1\%$ /Weekの変化しかない

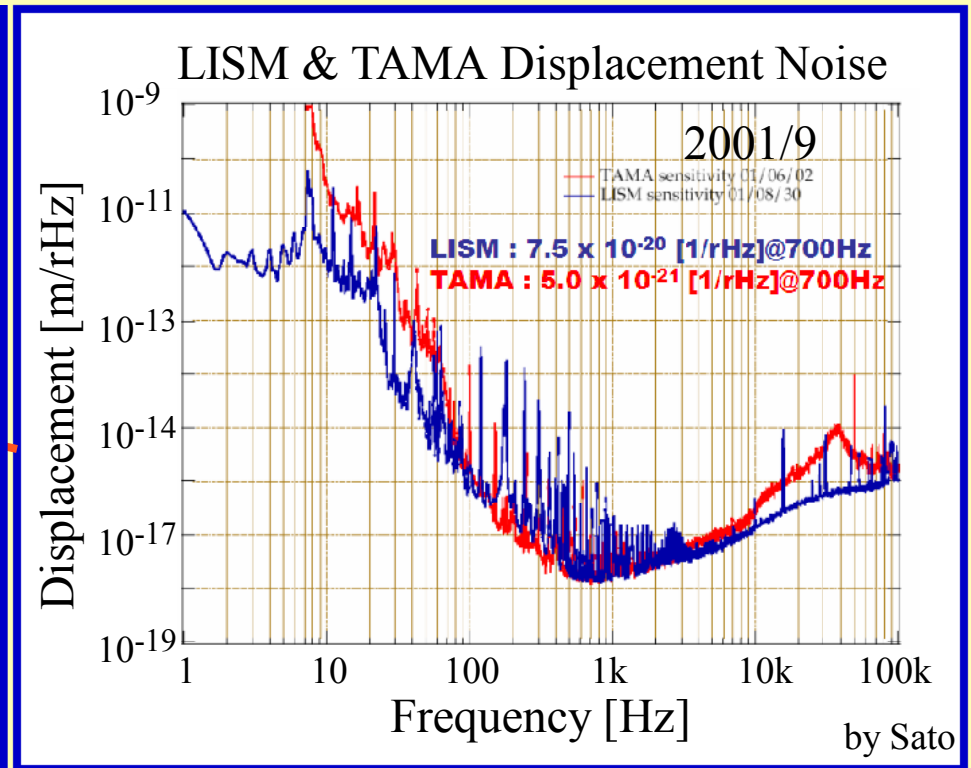
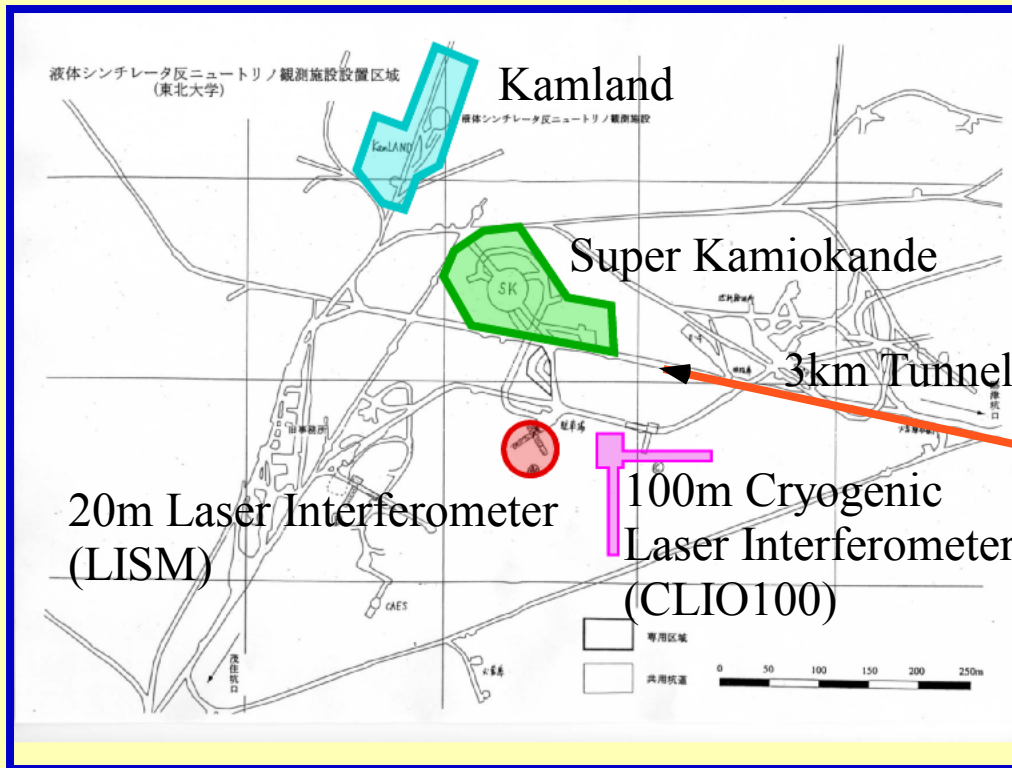
岩盤の弾性波速度
5000m/sec

by Araya



静粛・安定な環境の検証

20m レーザー干渉計(LISM)の移設と長期運転



基線長が短い干渉計で長い干渉計の安定性を予想するには？

>>> 腕Fabry-Perot共振器の光滞在時間を同レベルにする。

(LISMはTAMAの3倍、LCGTの1/7.5)

- 貧弱な防振系でもTAMAと匹敵する変位 (低周波領域)
- アライメント制御なしでも連続120時間運転
- 10Hzまでの地面振動の同相除去効果 (但し、腕長さによる)



LISM干涉計

神岡鉱山跡津入り口



LISM用の穴



LISM Center Room



LISM Optics Bench

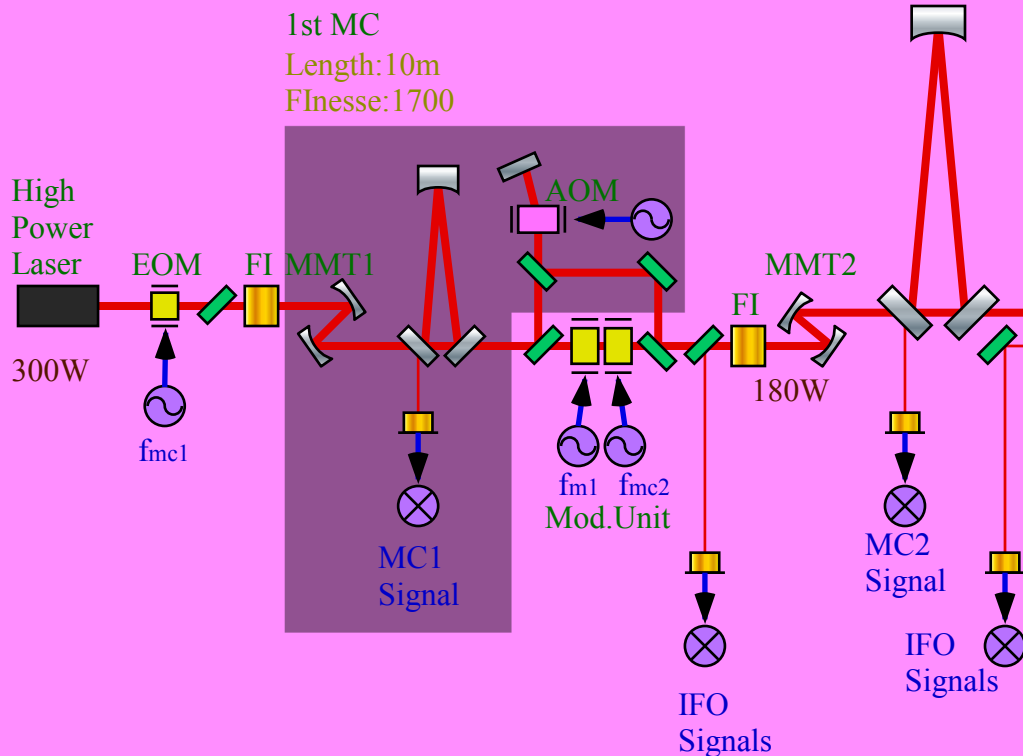


LCGTの光学系（全体図）

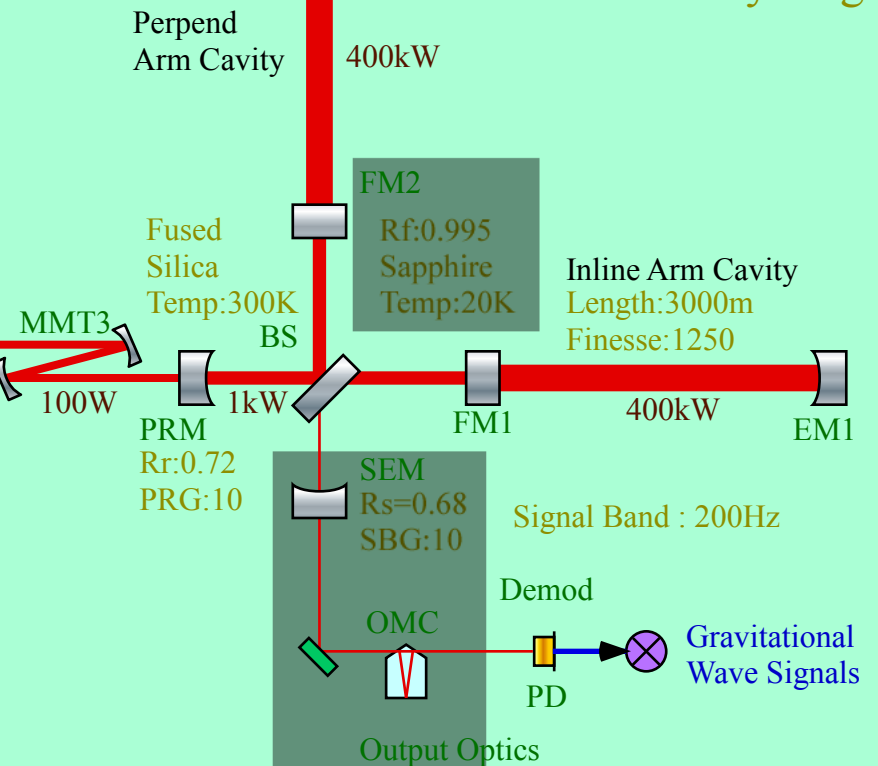
RSE技術とPower Recycling技術を投入しFabry-Perot Michelson型レーザー干渉計方式

Input Optics

Two Mode Cleaners and Modulation Unit



Main Interferometer Resonant Sideband Extraction Config. with Power Recycling

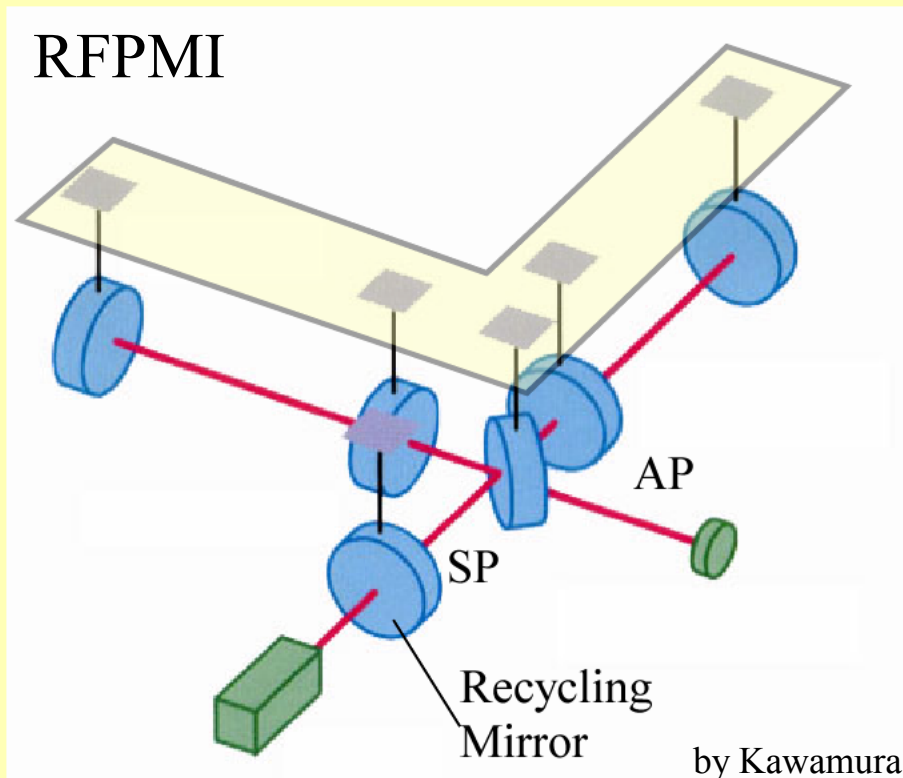


by Ando



LCGTの光学系 (Power Recycling)

■ Power Recycling → 有限のレーザーパワーを有効利用する方法

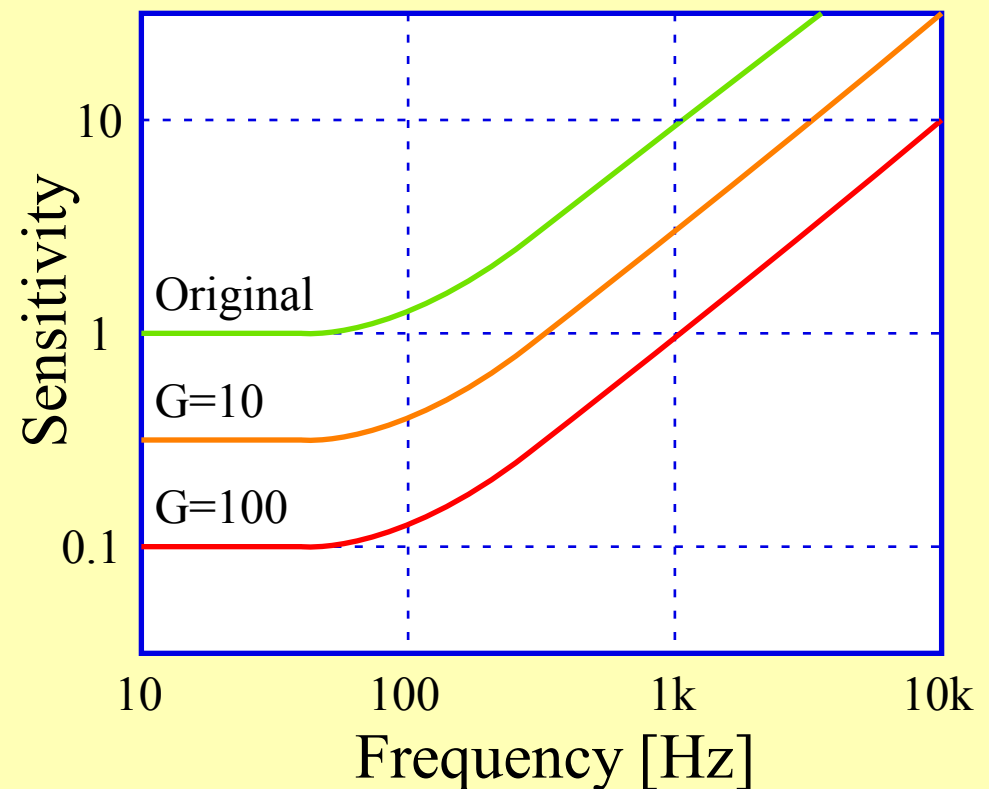


干渉計の重力波への応答の原理

- 重力波と相互作用した光子はAPで検出
- 相互作用しない大部分の光子はSPへよって大部分の光は捨てられるので、それを鏡で打ち返し、再利用する。

LCGTではリサイクリングゲイン10倍

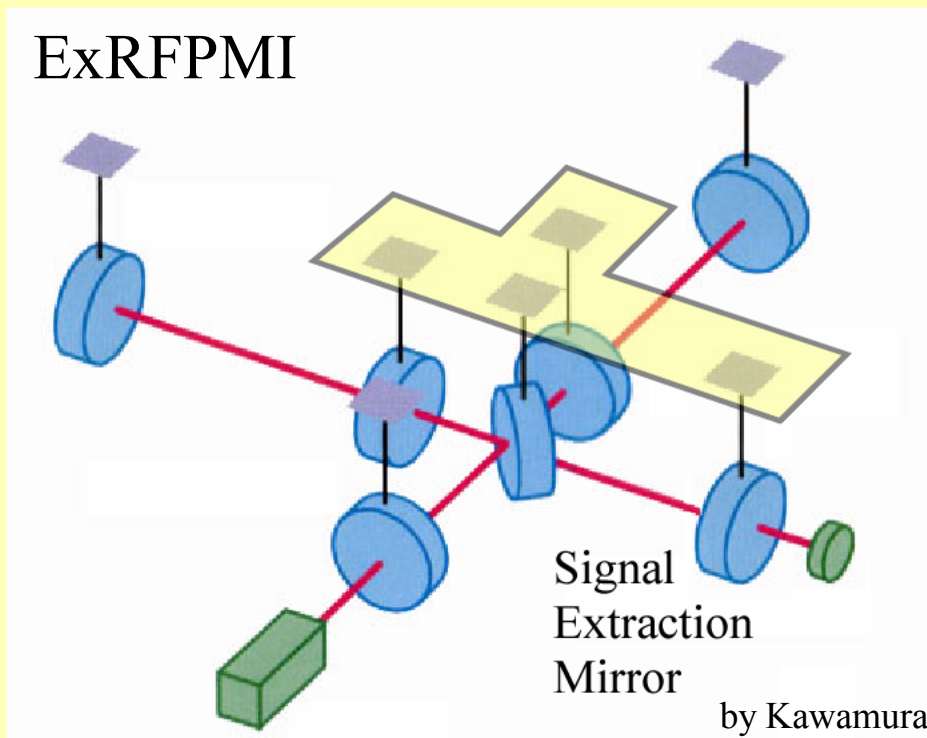
リサイクリングによる Shot雑音の向上



LCGTの光学系 (RSE)

■ Resonant Sideband Extraction (RSE)

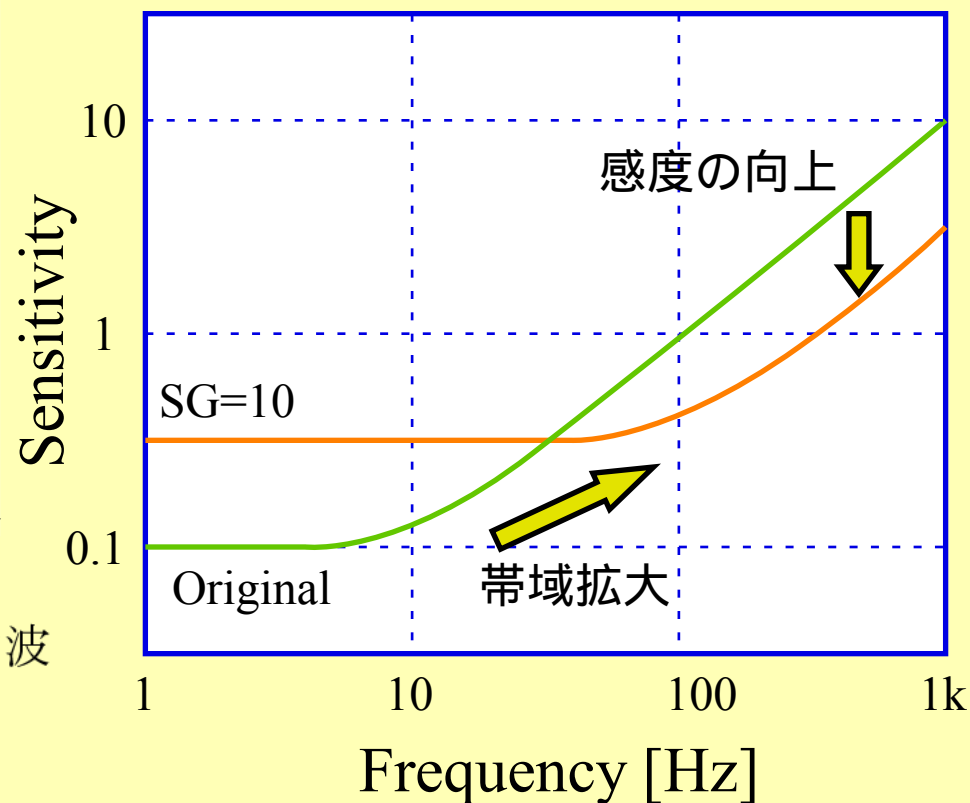
⇒ NM,BS通過パワーを減らす
同じ腕内パワーで帯域を広げる



重力波信号と光子の滞在時間の独立設定
光の滞在時間は腕共振器できるが、重力波信号の滞在時間はRSE鏡により調節可能

LCGTではシグナルバンドゲインも10倍
腕共振器のFinesse=1250までアップ

RSEによる帯域拡大と感度の向上

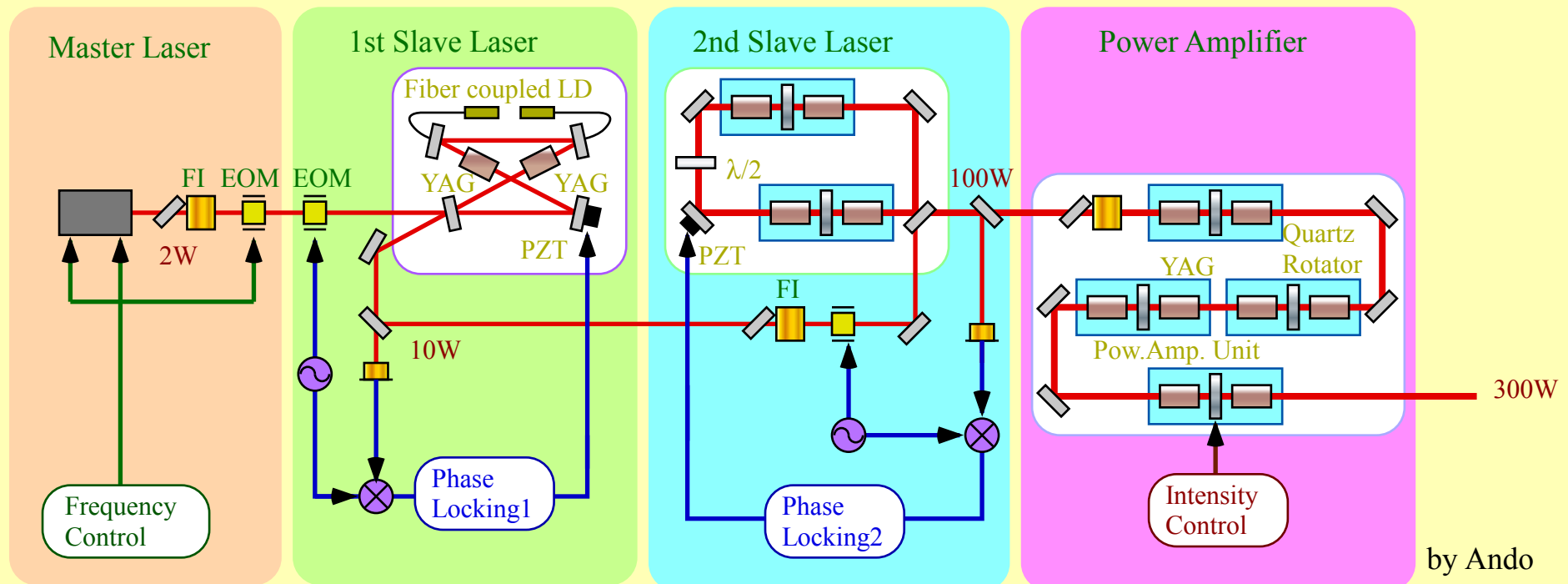


Laser Component

300W Laser, 1064nm by Mio

- Master Laser : 2W Nd:YAG Laser (LZH inc.)
- 1st Slave Laser : Injection Locking (2 YAG Rods), up to 10W
- 2nd Slave Laser : Injection Locking (4 YAG Rods), up to 100W
- Power Amp : CIDER & HIPER by MITSUBISHI inc, up to 300W

Alternative method : Coherent Addition by Musha



Laser Stability (Frequency)

Frequency Stabilization by Nagano

- Original Stability -

$$3 \times 10^4 / f \text{ [Hz/rHz]}$$

- 1st Stb. -

MC1(10m Finesse = 1700),
UGF 1MHz,
feedback to Laser PZT, Thermal
and Ext EOM.

down to 1×10^{-4} [Hz/rHz].

- 2nd Stb. -

MC2(180m Finesse = 1200),
UGF 100kHz,
feedback to MC1 End Mirror,
Feedaround in 1st loop.

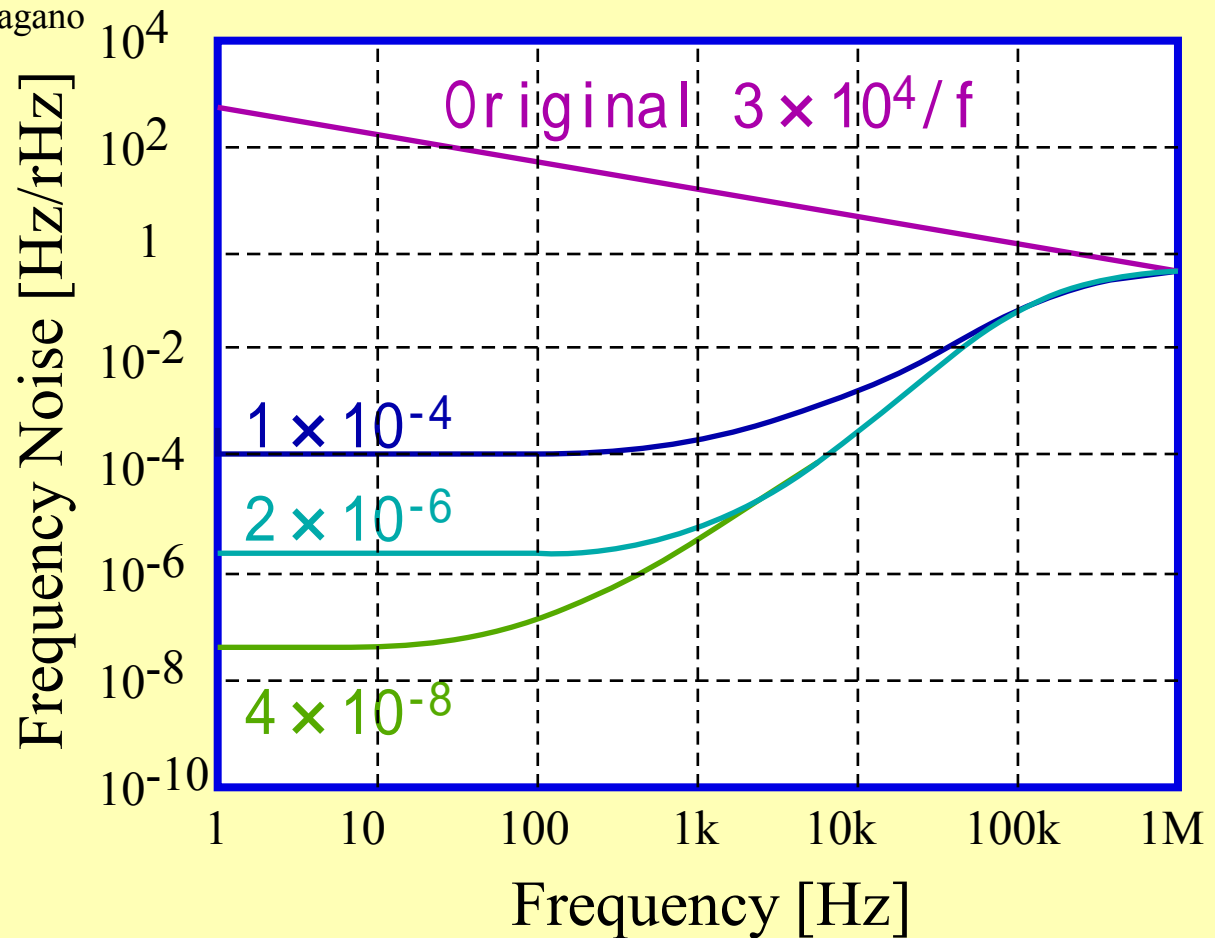
down to 2×10^{-6} [Hz/rHz].

- 3rd Stb. -

Arm Common Length (3000 m Finesse 1250), UGF 5kHz
feedback to MC2 End Mirror, Feedaround in 2nd loop.

down to 4×10^{-8} [Hz/rHz] (10^{10} Reduction @100Hz).

5×10^{-5} [Hz/rHz] (TAMA)



Laser Stability (Intensity)

Intensity Stabilization (AM)

- Original Stability -

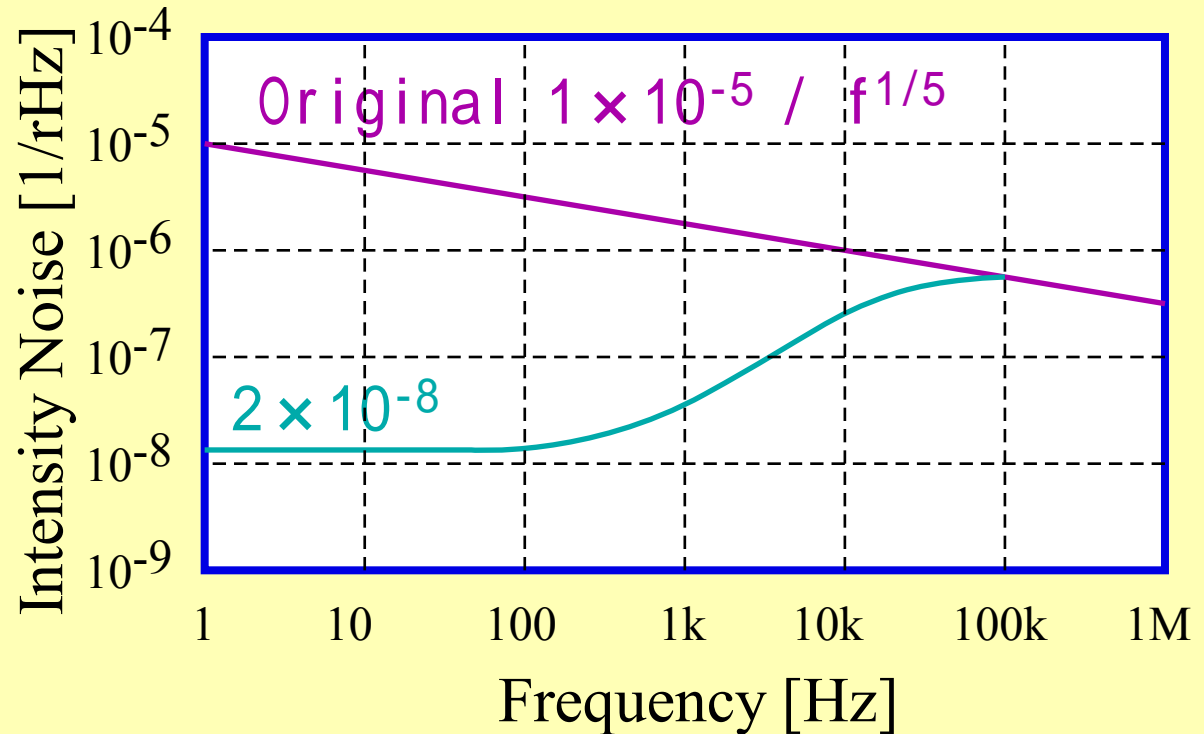
$$1 \times 10^{-5} / f^{1/5} \text{ [1/rHz]}$$

- 0st Stb. -

@ Laser Amplifier Output.

- 2nd Stb. -

@ MC2 output (20 [mW]),
UGF 100kHz,
feedback to Laser Current,
down to 2×10^{-8} [1/rHz].
(10^3 Reduction)



Intensity Stabilization (FM)

Filtered by MC1 & MC2

3.2×10^{-6} reduction is expected.

5×10^{-5} [Hz/rHz] (TAMA)

by Nagano



Input and Output Optical Components

Input : 2 Mode Cleaners and 4 Frequency modulations

- 1st Mod: EOM, for 1st MC control.
- 1st MC : Suspended Ring Type, 10m, $F=1700$,
for Mode Cleaning, Frequency and FM/AM Intensity Noise Reduction.
Signals are feedback to Laser PZT, Thermal and Ext EOM.

- 2nd Mod :EOM, for 2nd MC control.
- 3rd Mod :EOM, for Interferometer control, transmitting through MC2.
- 4th Mod :AOM, Single Sideband for RSE Mirror Control,
transmitting through MC2.
- 2nd MC : Suspended Ring Type, 180m, $F=1200$,
for Mode Cleaning, Frequency and FM/AM Intensity Noise Reduction.
Signals are feedback to MC1 mirror and Feedaround.

Output : 1 Output Mode Cleaner

- OutMC : Rigid Ring Type, ??m, $F=100$
for removing unperfectly intereferred light and Scattered light.



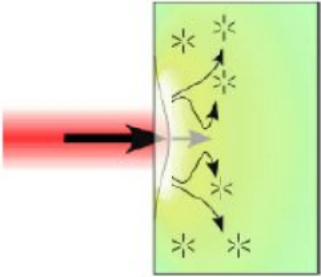
Thermal Noise (1)

■ 熱雑音の種類

- Brownian Noise -

揺動散逸理論から導かれる。熱浴にある物体は、その熱により揺動され、そのエネルギーは格子欠陥などの何らかの機械的ロス（よくわかっていない）が原因となり、主にその物体の共振周波数に集中して散逸してゆくが、その集中度は物体の機械的ロス（ $\phi=1/Q$ ）が小さいほど、大きいので、結果、他の周波数のエネルギー密度は少ない、つまり熱振幅としては小さくなる。

鏡を懸架するワイヤーの熱雑音（共振周波数以上）



内在する機構

$$\begin{aligned} h_{\text{sus}} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{4k_B T_p (2\pi f_{\text{pen}})^2}{m Q_{\text{pen}} \omega^5}} \\ &= 8.9 \times 10^{-26} [\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{1.2 \times 10^8}{Q_{\text{pen}}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_p}{10\text{K}} \right)^{1/2} \\ &\quad \times \left(\frac{50\text{kg}}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{f_{\text{pen}}}{0.7\text{Hz}} \right) \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \left(\frac{100\text{Hz}}{f} \right)^{5/2} \end{aligned}$$

対策

- 温度を下げる
- Q値を上げる
- ビーム径を広げる
- 鏡を重くする

鏡の熱雑音（共振周波数以下）

$$\begin{aligned} h_{\text{mirror(structure)}} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{4k_B T_m (1 - \sigma^2)}{\sqrt{\pi} E_0 w_0 Q_{\text{mirror}} \omega}} \\ &= 5.8 \times 10^{-25} [\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{10^8}{Q_{\text{mirror}}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_m}{20\text{K}} \right)^{1/2} \\ &\quad \times \left(\frac{3\text{cm}}{w_0} \right)^{1/2} \left(\frac{4.0 \times 10^{11}\text{Pa}}{E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \left(\frac{100\text{Hz}}{f} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

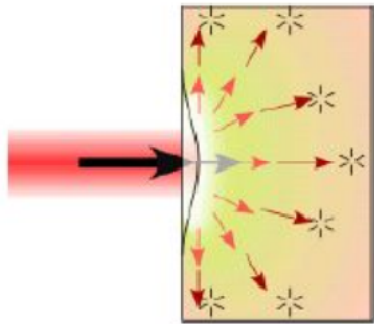


Thermal Noise (2)

■ 熱雑音の種類

- Thermo Elastic Noise -

非一様なゆがみによって発生する局所的な温度勾配の緩和によって散逸が生じている。



温度勾配-弾性変形

$$\begin{aligned}
 h_{\text{mirror(thermo)}} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \alpha^2 (1 + \sigma)^2 k_B T_m^2 \frac{1}{(\kappa \rho C)^{1/2}} \frac{1}{\omega^{1/2}}} \\
 &= 9.4 \times 10^{-25} [\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{\alpha}{5.6 \times 10^{-9} / \text{K}} \right) \left(\frac{T_m}{20 \text{K}} \right) \\
 &\quad \times \left(\frac{1.57 \times 10^4 \text{W/m/K}}{\kappa} \right)^{1/4} \left(\frac{4.0 \text{g/cm}^3}{\rho} \right)^{1/4} \left(\frac{0.69 \text{J/kg/K}}{C} \right)^{1/4} \\
 &\quad \times \left(\frac{3 \text{km}}{L} \right) \left(\frac{100 \text{Hz}}{f} \right)^{1/4}
 \end{aligned}$$

対策

- 温度を下げる
- 膨張率を下げる
- 熱伝導率を上げる

- Thermal Noise due to additional loss (Magnets, coating, standoff)

機械的散逸が鏡に散逸中心と光のスポットが接近している場合は大きく出るに取り付けられた物質によって発生している場合。よって鏡のコーティングによるロスも重要な熱雑音源になる。

$$\begin{aligned}
 h_{\text{mirror(coating)}} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{8 k_B T_m (1 + \sigma) (1 - 2\sigma) d_{\text{coating}} \phi_{\text{coating}}}{\pi w_0^2 E_0 \omega}} \\
 &= 1.2 \times 10^{-24} [\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{\phi_{\text{coating}}}{4 \times 10^{-4}} \right)^{1/2} \left(\frac{d_{\text{coating}}}{5 \mu\text{m}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_m}{20 \text{K}} \right)^{1/2} \\
 &\quad \times \left(\frac{3 \text{cm}}{w_0} \right) \left(\frac{4.0 \times 10^{11} \text{Pa}}{E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{3 \text{km}}{L} \right) \left(\frac{100 \text{Hz}}{f} \right)^{1/2}
 \end{aligned}$$

対策

- 温度を下げる
- ビーム径を広げる



熱雑音を下げるには

Beam径を大きく 鏡を重くする

- Merit -

現在の光学素子を超大型にするだけ

- Demerit -

超大型鏡がそもそもできるか？
同等の品質が得られるか？
あるいは、特殊な拡大光学系を組む必要
があるがそれを実現する光学素子ができるか？

- Solution -

基材 : 熔融石英 or サファイア
大きさ : ~ 50cm --- 1m (通常光学系)
~ 30cm (拡大光学系)

冷却する

(同時に Q , κ , α が改善する相乗効果あり)

- Merit -

すべての熱雑音を下げられる
サファイアは、低温化で Q , κ が上昇、 α が減少
(鏡の標準基材である熔融石英は例外的に Q が悪
化し、熱伝導も悪いが、 α が0になる特異温度
がある)

- Demerit -

冷却系が必要
冷却系からの地面振動の流入がありうる
鏡がクライオポンプになって汚染されやすい
鏡の発熱を押さえなければならない

- Solution -

基材 : サファイア
大きさ : ~ 30cm (通常光学系)

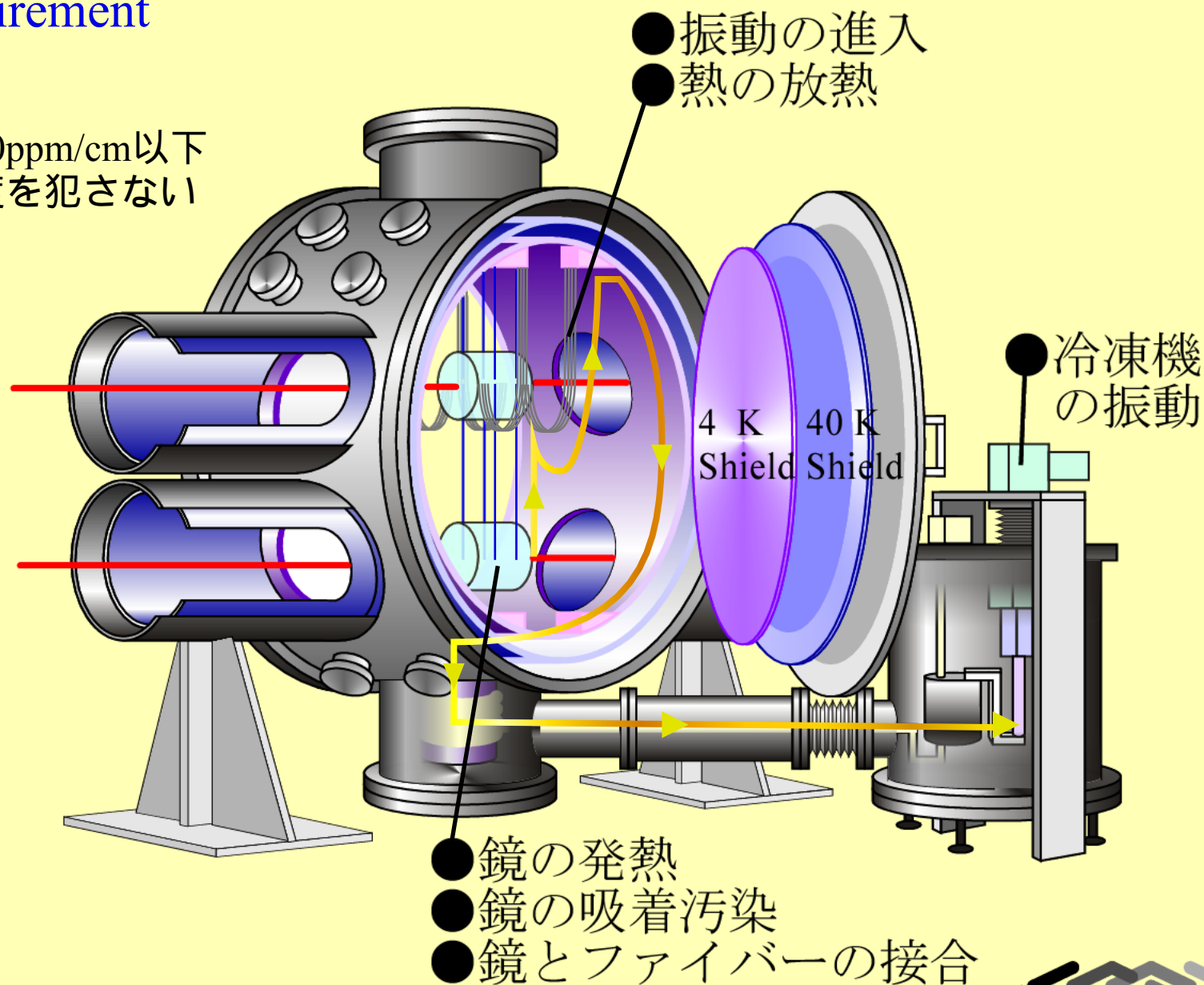
LCGTの選択



低温鏡懸架・冷却概念図と問題点

LCGTのRequirement

- 最大放熱量は1W
- サファイアの吸収20ppm/cm以下
- 冷却系の振動が感度を犯さない

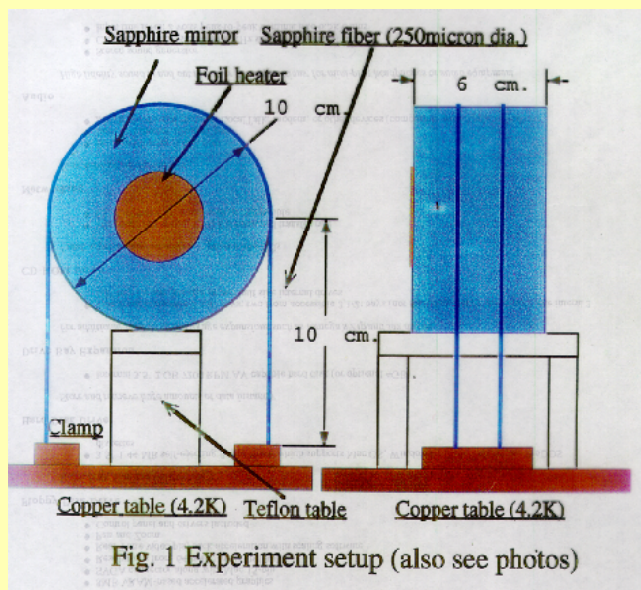


鏡と懸架ファイバーの選定と冷却

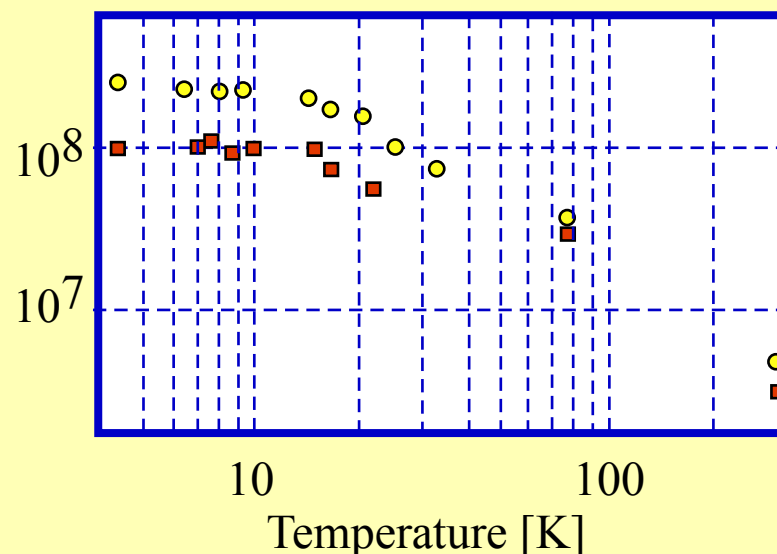
サファイア鏡をサファイアファイバーで冷やす

- Cooling method of suspended mirrors
 - Use the **suspension sapphire fibers as heat path**
(PLA, 242 (1998) pp 211-214, T.Uchiyama *et al*)
- High mechanical quality factor of sapphire
 - $Q \sim 10^8\text{-}9$ for a mirror, $\sim 10^9$ for a suspension fiber.
(System with small dissipation. Univ - Chicago Press. V.B. Braginsky *et al*)
(PLA, 261 (1999) pp 5-11, T.Uchiyama *et al*)
(PLA, 273 (2000) pp 310-315, T.Uchiyama *et al*)
 - $Q \sim 10^7$ for a mirror glued with for magnets at 20 [K].

Sapphire Fiber as Heat Path



Q Enhancement of Sapphire Bulk



鏡と懸架ファイバーの特性確認

サファイア鏡、サファイアファイバーの特性検証

- Characterization of sapphire at cryogenic temperature

--- Excellent : Specific Heat (c), Thermal Expansion (α), Thermo-optic coefficient (dn/dT)
(CQG, 19 (2002) pp2045-2049, T.Tomaru *et al*)

--- Acceptable : Birefringence
(PLA, 237 (1998) pp 337-342, F.Benabid *et al*)

--- Inadequate : Optical Absorption Loss (3 - 150 ppm/cm). 20 ppm/cm is required for LCGT.
(PLA 283 (2001) pp80-84, T.Tomaru *et al*)

Thermal Expansion

$$\alpha < 10^{-7} \text{ @ } 4.2 \text{ [K]}$$

--- Reduces

Thermo Elastic Noise

Thermo-optic coefficient

$$dn/dT < 10^{-7} \text{ @ } 4.2 \text{ [K]}$$

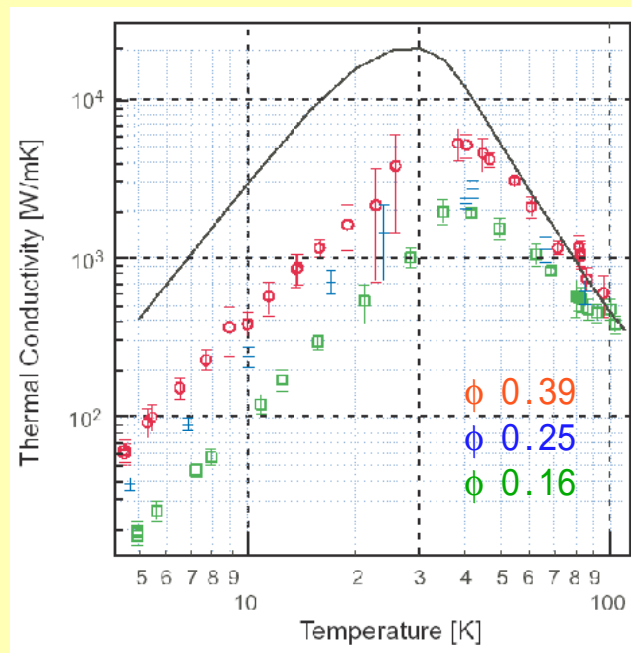
Thermal Conductivity

$$\kappa \sim 2 \times 10^4 \text{ @ } 30 \text{ [K]}$$

--- Reduces Thermal Lensing

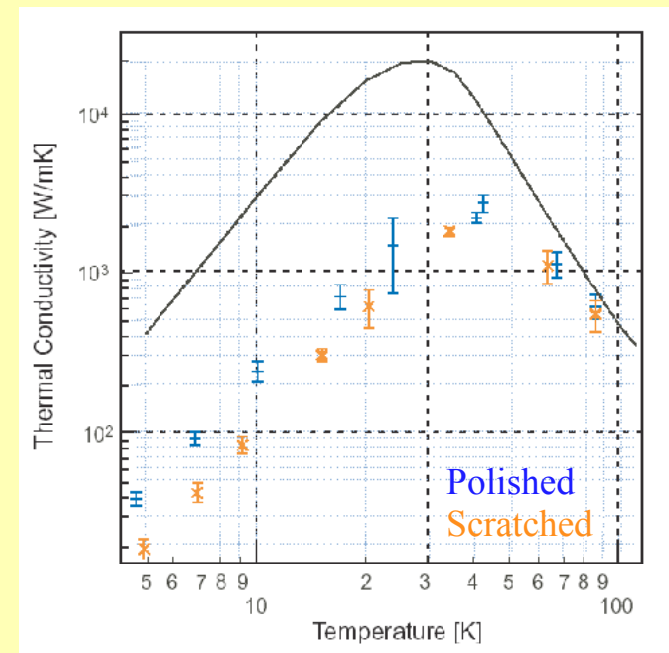
Size Effect of Sapphire Fiber

κ (熱伝導率) d



Thermal Conductivity

Reduction by Phonon Reflection

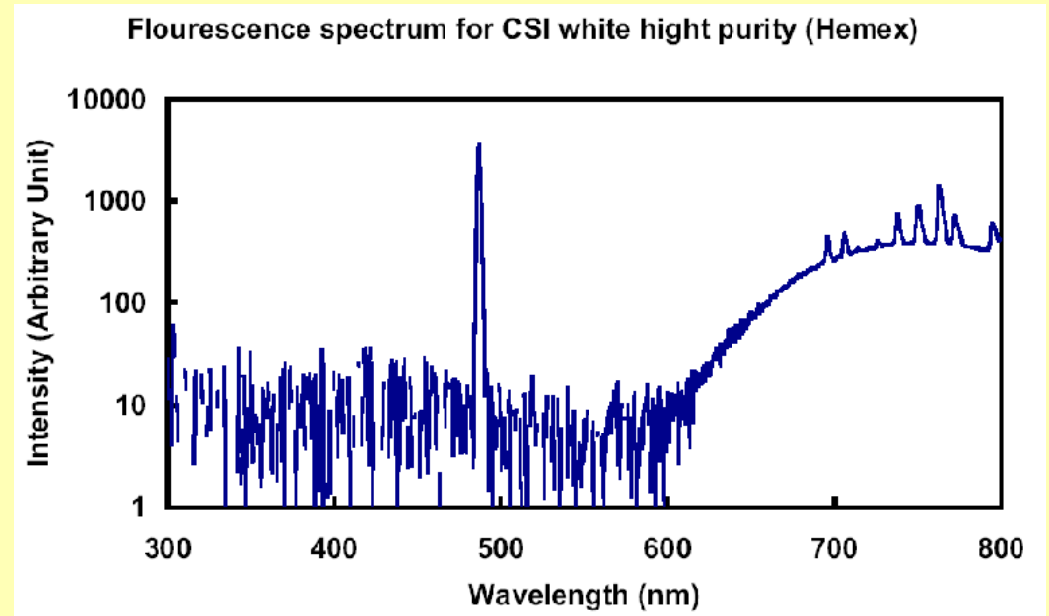


サファイア光吸収の特定と低減

光熱吸収の原因特定

1 μm 付近に吸収体はないが、真空紫外や、可視光領域の吸収の裾野が影響している可能性がある。

- 真空紫外領域の吸収：F-center
- 可視光領域の吸収：Cr³⁺、Ti³⁺などの不純物



光熱吸収の低減

- アニールング (Stanford Univ.)
1600度程度で48時間アニールング。25ppm/cm が小さなサンプルで得られた。
- 米田助教授が挑戦中 (電通大学)。面白い結果が得られたが、まだConfidential。



鏡の汚染の防止

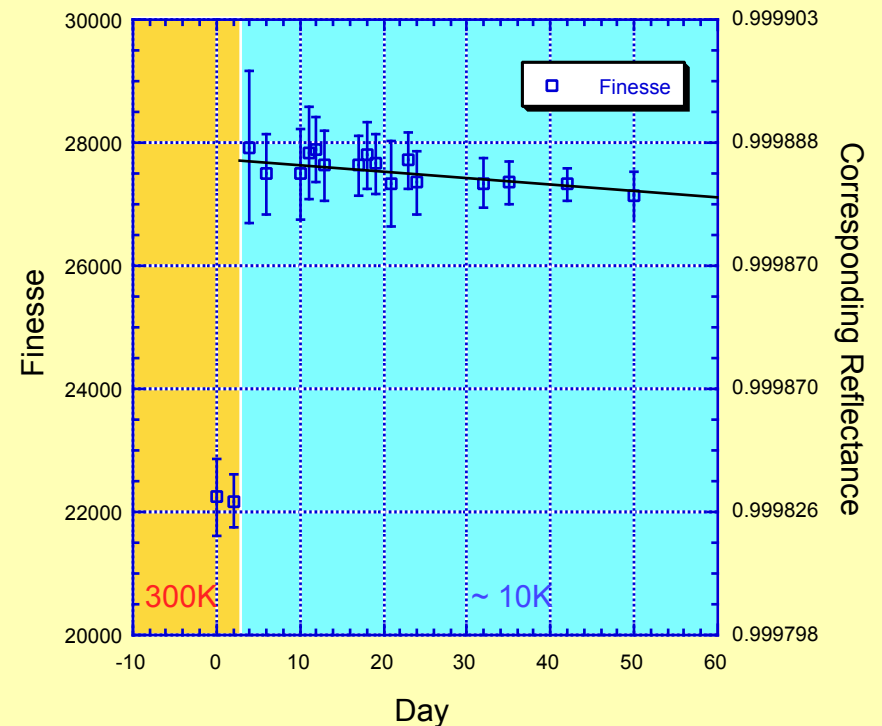
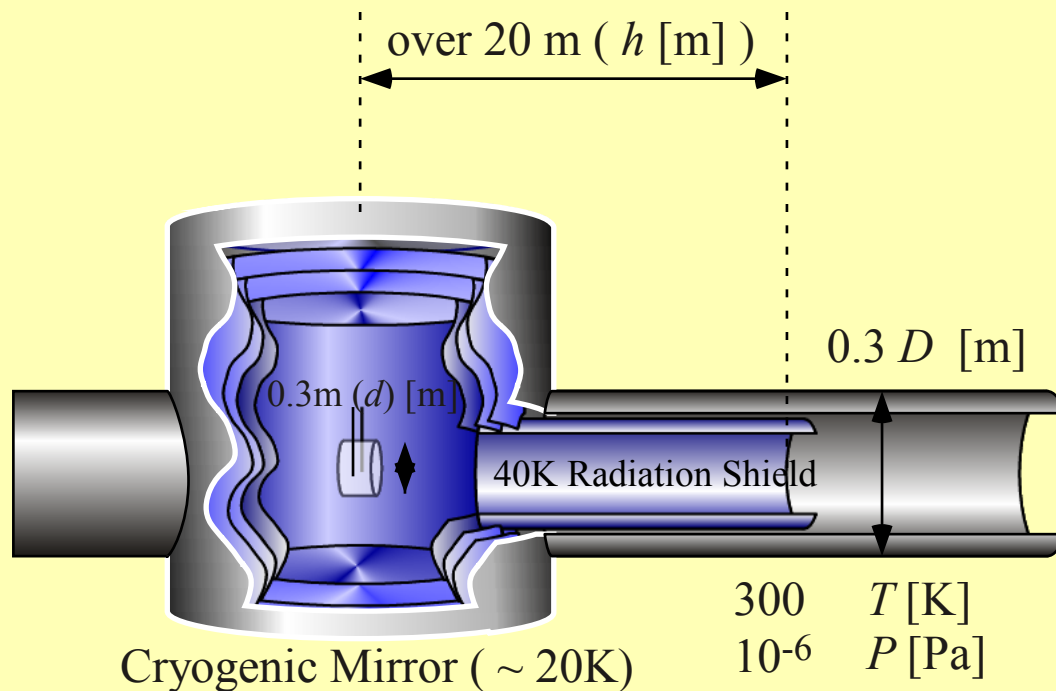
汚染は輻射遮蔽板で抑える。

- Cryogenic contamination

--- No damage due to cooling of a ultra-low loss dielectric multilayered coating mirror.

(Cryogenics. 40 (2000) 61-66. Miyoki *et al*)

--- 0.012 ppm/day contamination speed for 0.3 m diameter, 10^{-6} Pa vacuum and 10m Shield.



Molecule flux
on a mirror

$$\left(\frac{d}{4h}\right)^2 \frac{P}{\sqrt{2\pi m k T}} [1/m^2]$$



Heat Link 素材特性の確認と選定

超高純度アルミ・銅の低温での熱伝導・機械的Q値 by Kasahara

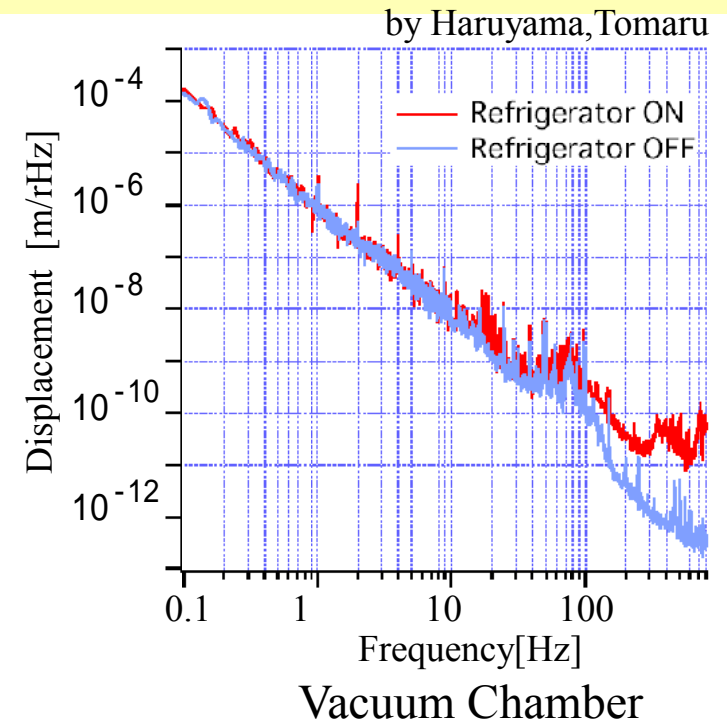
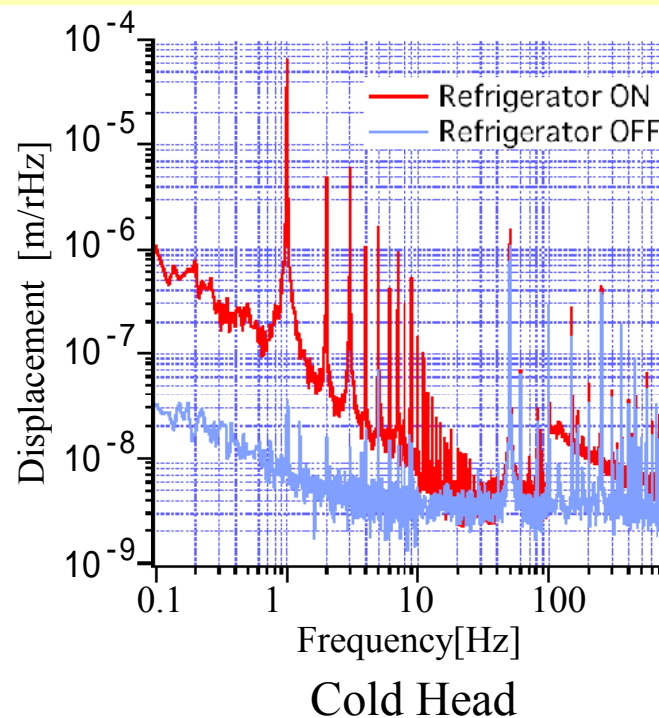
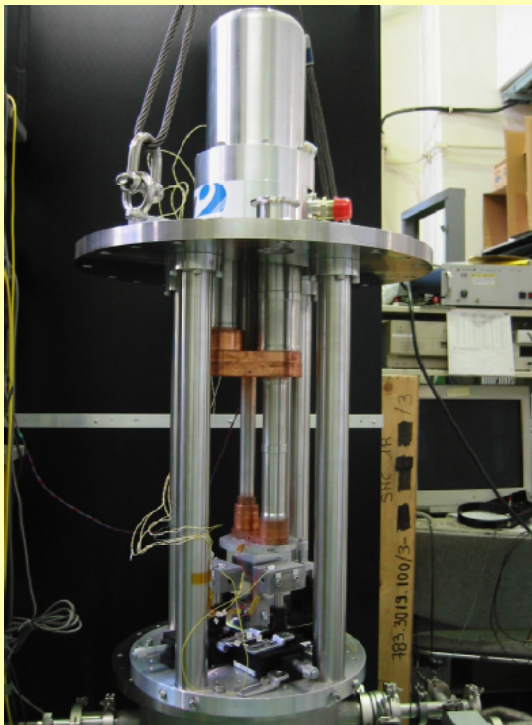
- Thermal Conductivity of 5N aluminum (ϕ 0.2, 0.5, 1, 2) and 7N Copper (ϕ 0.2, 1)
 - 20000 [W/m/K] @ 10 K for $\phi > 0.5$ mm (High RRR)
 - 10000 [W/m/K] @ 10 K for $\phi \sim 0.2$ mm (low RRR)
 - Note: RRR(Residual Resistance Ratio) are likely to be small as the diameter becomes smaller.
The Manufacturing process might spoil RRR as the diameter becomes smaller.
 - We verified RRR can predicts thermal conductivity. --- κ (熱伝導率) RRR not diameter.
 - No size effect was verified for more than ϕ 0.2 mm diameter wires.
 - 50 times U - shape bending cycles reduced the thermal conductivity by 10 %, which is not fatal in practicability.
 - Q value of Al and Cu wires are 400 and 1630 @ 8 [K], respectively.
 - Young Modulus @ 8 [K] is 1.5 times bigger than that @ 300 [K]. Al is softer than Cu .
- Al is best for heat link material.
- Thermal noise of heat link wire is verified below the design sensitivity in spite of the wire's low Q.
- Seismic noise (Vertical - Horizontal coupling) through heat link wire is comparable with the design sensitivity assuming 1/100 isolation by SPI (Suspension Point Interferometer).



低振動冷凍機・防振熱伝導機構の開発

防振ステージ付GM型Pulse Tube冷凍機の開発(住友重機と共同)

- 鉦山の中なので、液体Heを使用するのはあまり現実的ではない。初期冷却のために液体窒素を使用する解は残っている。 --- > 冷凍機に着目。しかし、**振動がある**。
- 市販GM型Pulse Tube冷凍機でも駆動周波数1Hzとそのハーモニクスでは 10^{-4} [m/rHz]の振動があり、それをできる限り4Kシールドの場所で（目標は神岡地面振動レベル）まで低減する。（**産業的にも低振動化の要請**があるが重力波の要求は最高を要求する）



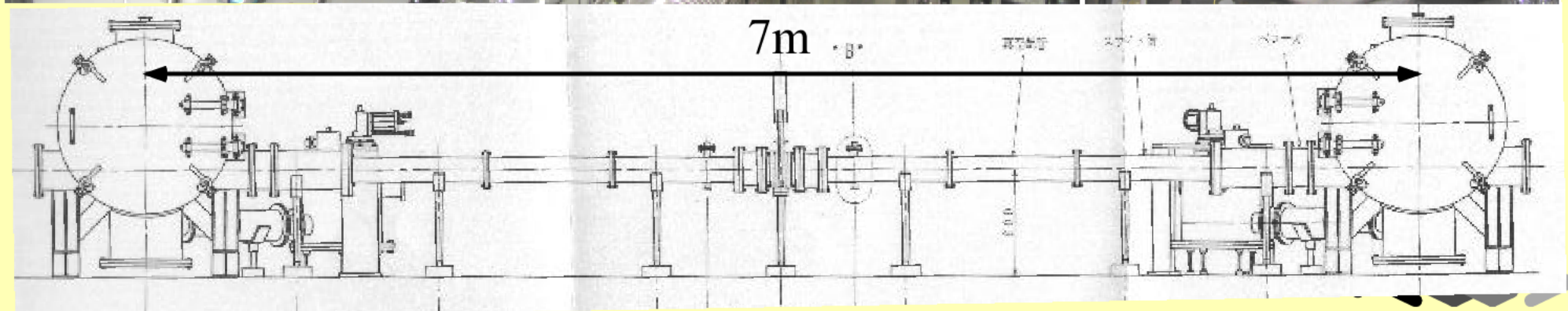
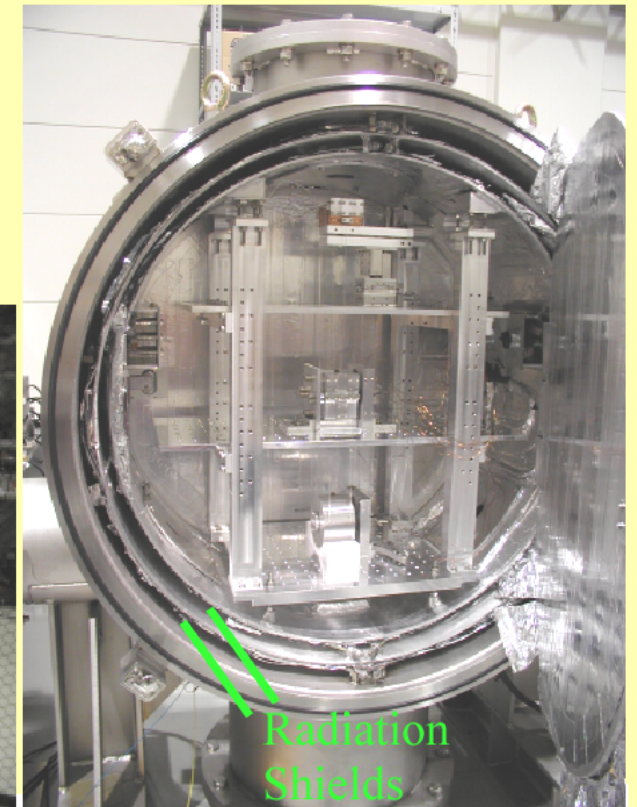
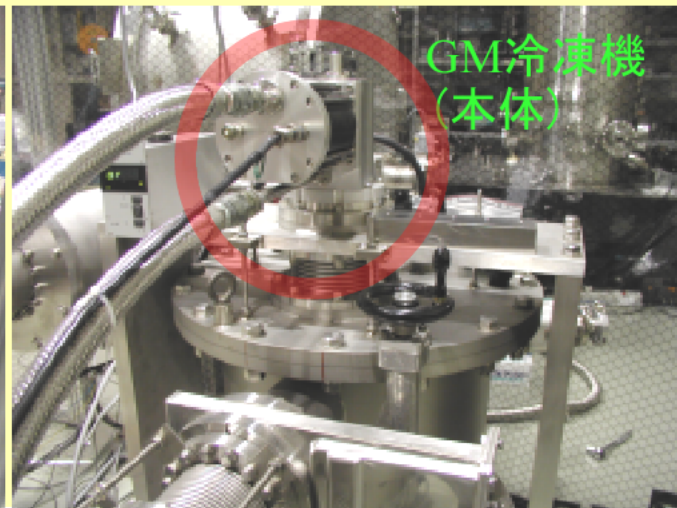
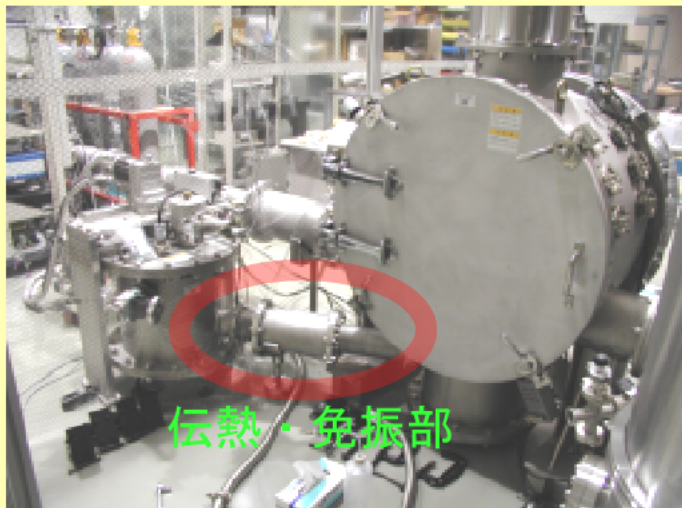
低温鏡レーザー干渉計 (1)

■ 低温鏡レーザー干渉計のプロトタイプ (CLIK)

--- LCGTで予想される構成の検証 ---

(冷凍部) 目標性能：0.7W @ 4K Shield

- GM冷凍機による伝熱冷凍システムの導入
- 2枚の遮熱板 (6Kと90K) による低温真空の形成
- 遮熱ダクトによる鏡汚染防止構造の導入

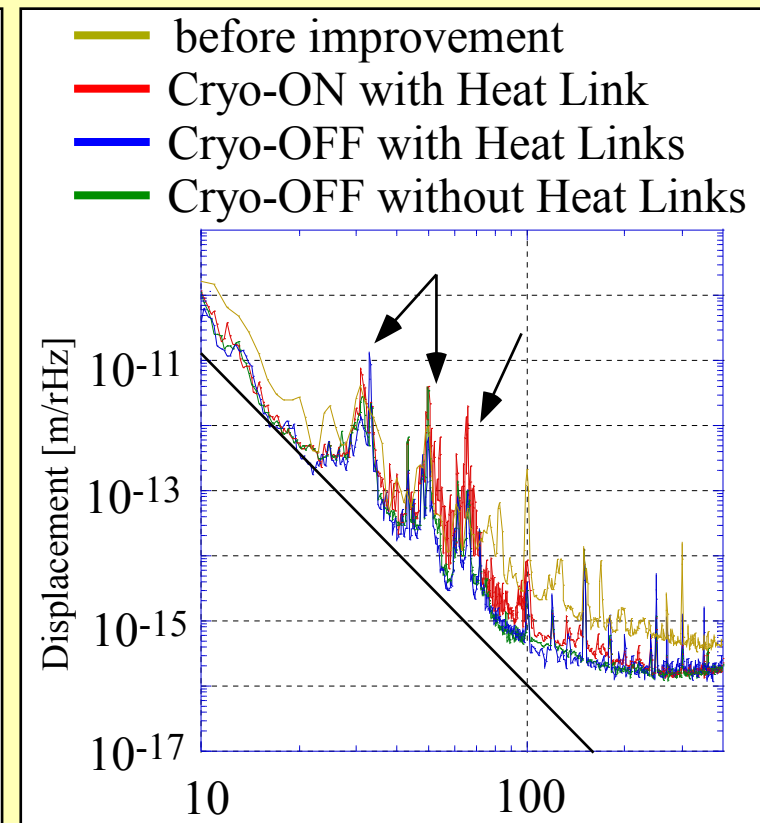
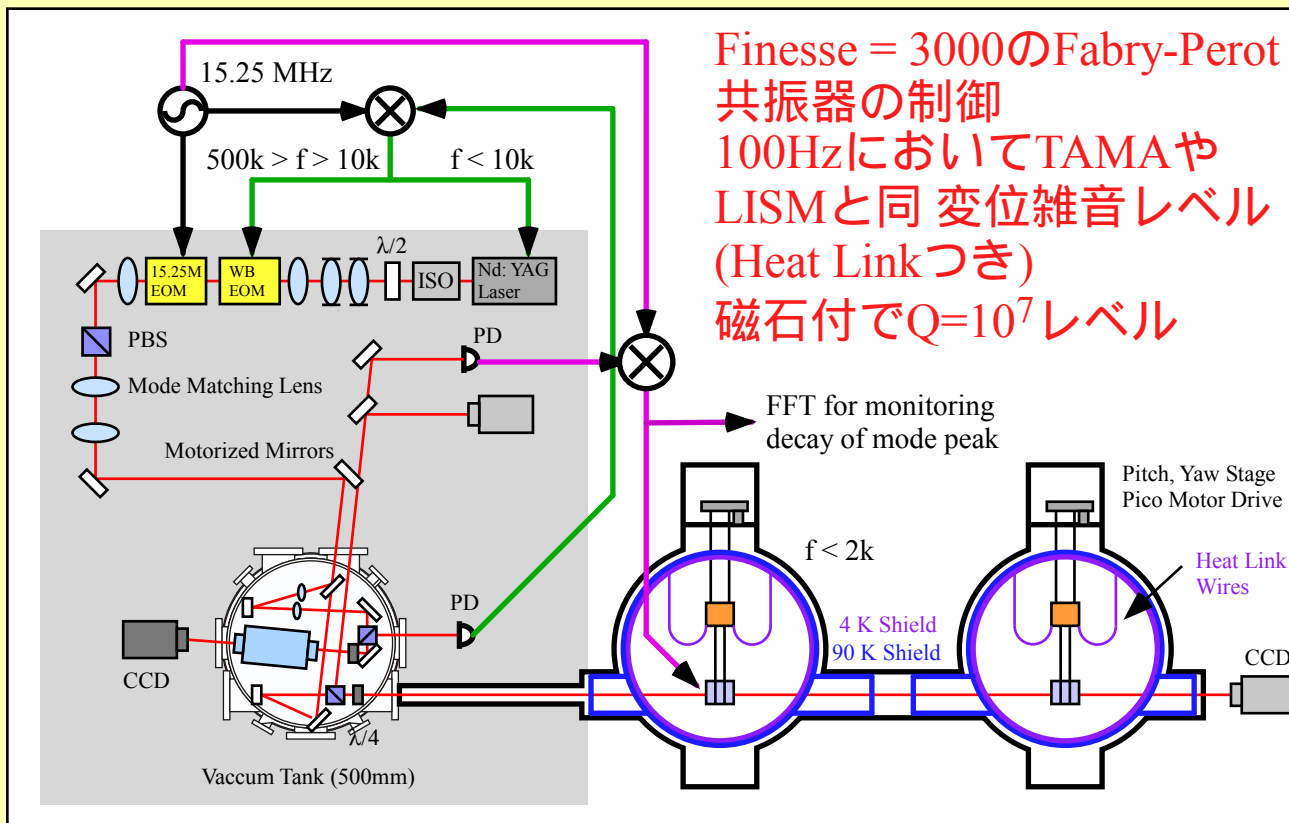


低温鏡レーザー干渉計 (2)

低温鏡レーザー干渉計のプロトタイプ (CLIK)

(鏡懸架部)

- 低温サファイア鏡 (20K)
- 低温真空槽内での2段振り子防振構造
- 低温における磁石コイル力による鏡の位置・姿勢制御
- 純アルミ (99.99%) U字Heat Linkの導入
- サファイアファイバーによる冷却
- 常温-低温接続懸架ワイヤーの選定
- 低温部 (上段マスと鏡) の常温部 (300K) からの懸架とラフ姿勢コントロール



Suspension Point Interferometer

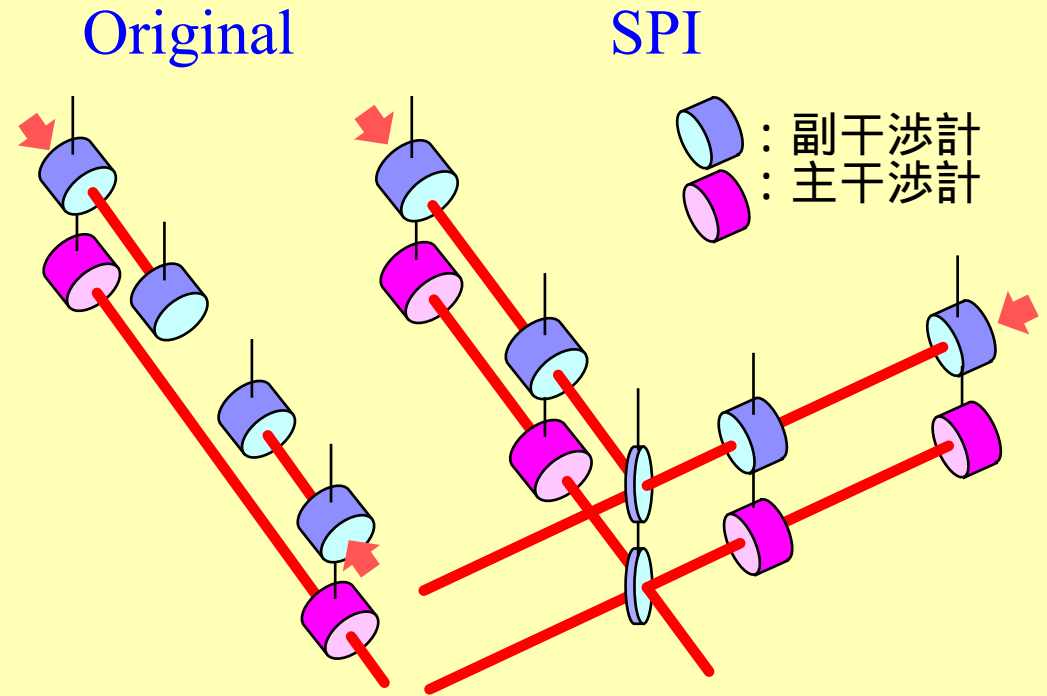
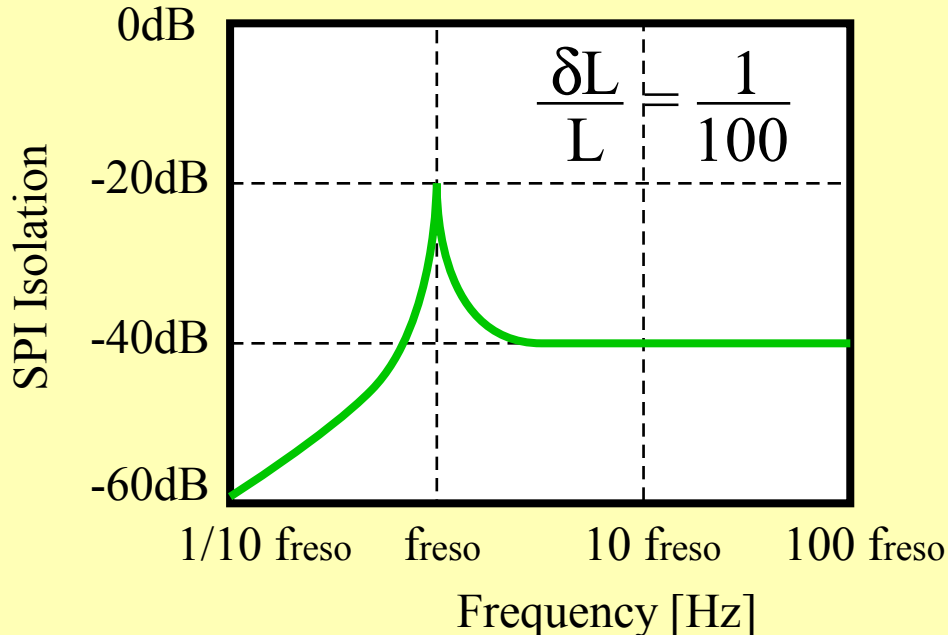
SPIとは by Aso

発想: 二段振り子の上段マスを何か極めて防振されたマスに対し追随させることで防振し、主鏡を防振する。
(絶対変位防振)

発展: 上段マスでも共振器を組んで、その同相変位を落とせば、下の主干涉計の防振になる。
(相対変位防振)

SPIの防振性能基本

振り子の長さの対称性が重要



SPIの機能

- Heat Link系の防振
- 制御系の雑音の低減と上段マス制御のダイナミックレンジの拡大
- 高周波帯域で感度を持つVeto副干涉計



低周波防振装置

低周波防振機構

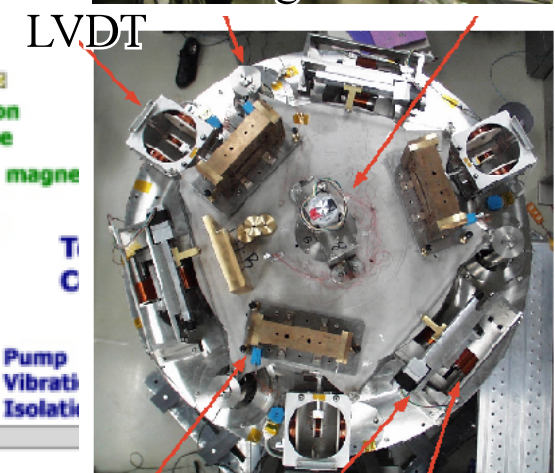
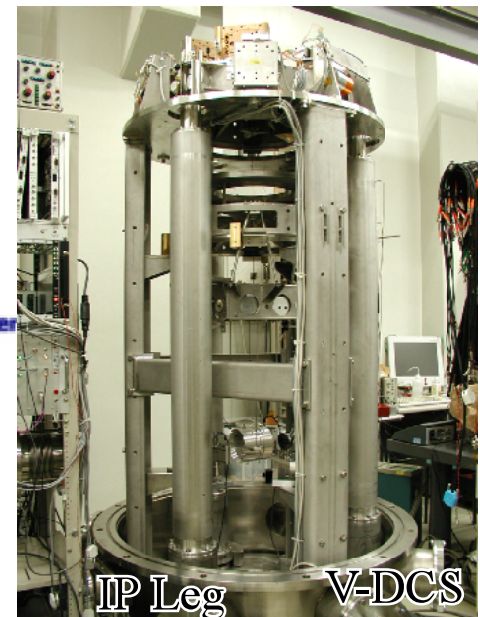
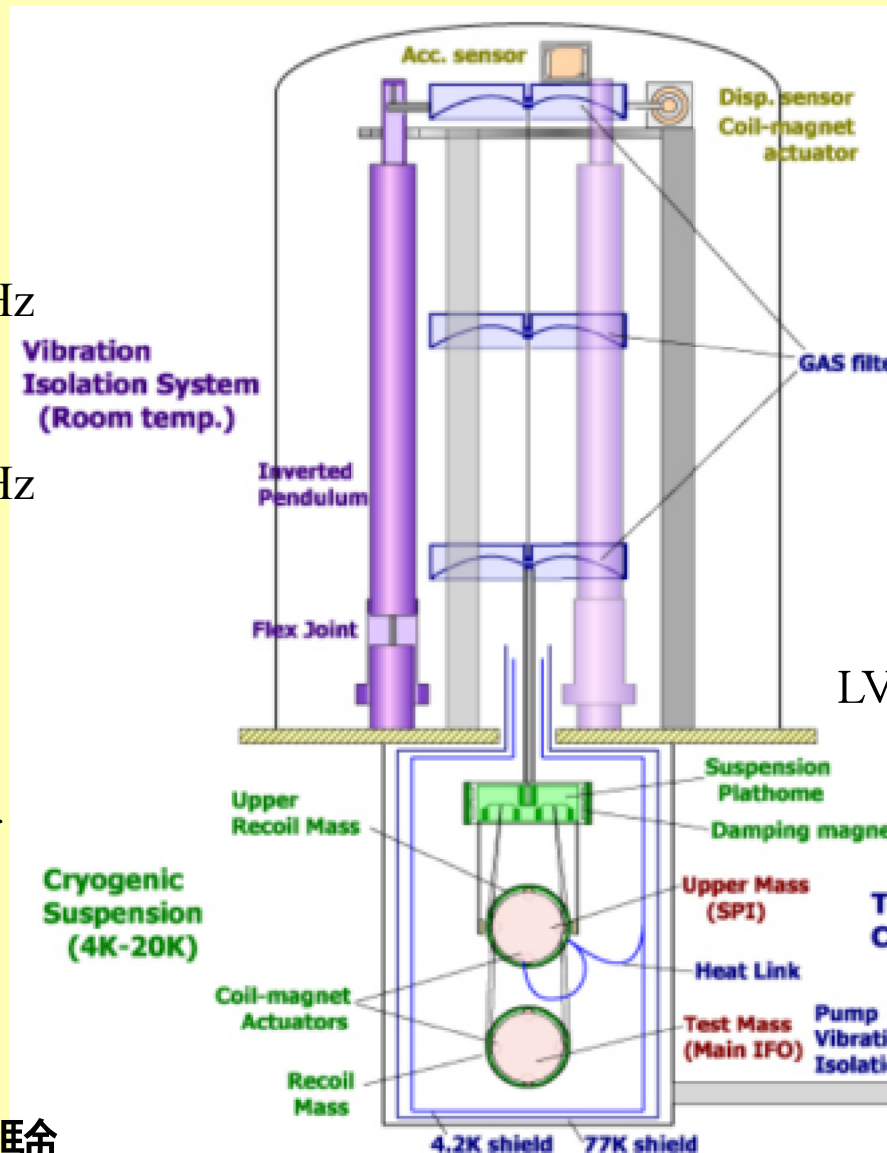
Isolation

by Takamori

- Inverted Pendulum
 - 0.03-1 Hz付近の共振
 - 50dB Attenuation @ 1Hz
- GAS
 - 0.3 Hz付近の共振
 - 50dB Attenuation @ 5Hz
- Mini-GAS
 - 1.5 Hz付近の共振

Control

- Position Control
 - LVDT, Syepping Motor
- Inertial Dumping
 - ACC. Sensor
 - Magnet Coil Force



Acc H-DCS Mag-Coil

TAMA SASで検証試験を行う。



Summary

地上最後の量子雑音で感度が決定される重力波レーザー干渉計として日本ではLCGT計画の具体的デザインが進んでいる。

LCGT計画を特徴づける低温技術に関するR&Dも具体的な干渉計への組み込みデザインができる段階までできているが、サファイアの高品質化や冷凍機の低振動化など、企業との密接な連携が必要な課題も残っている。

重力波源が欲しい（但し、10---1kHzの間）

