

低温レーザー干渉計CLIO(27) (低温実験(III))

発表者：三代木伸二
(東大宇宙線研, JST)

and

CLIO collaborators

内山・宮川・斎藤・我妻・大橋・黒田・中谷・寺田・山元・鈴木・都丸・新富・山本・田越・
佐藤・高橋・辰巳・新井・和泉・高橋・川村・藤本・麻生・安東・神田
新谷・高森・森井・竹本・福田・花田・堀・吉井・名和・川崎・東・今西・池田・早河・田村

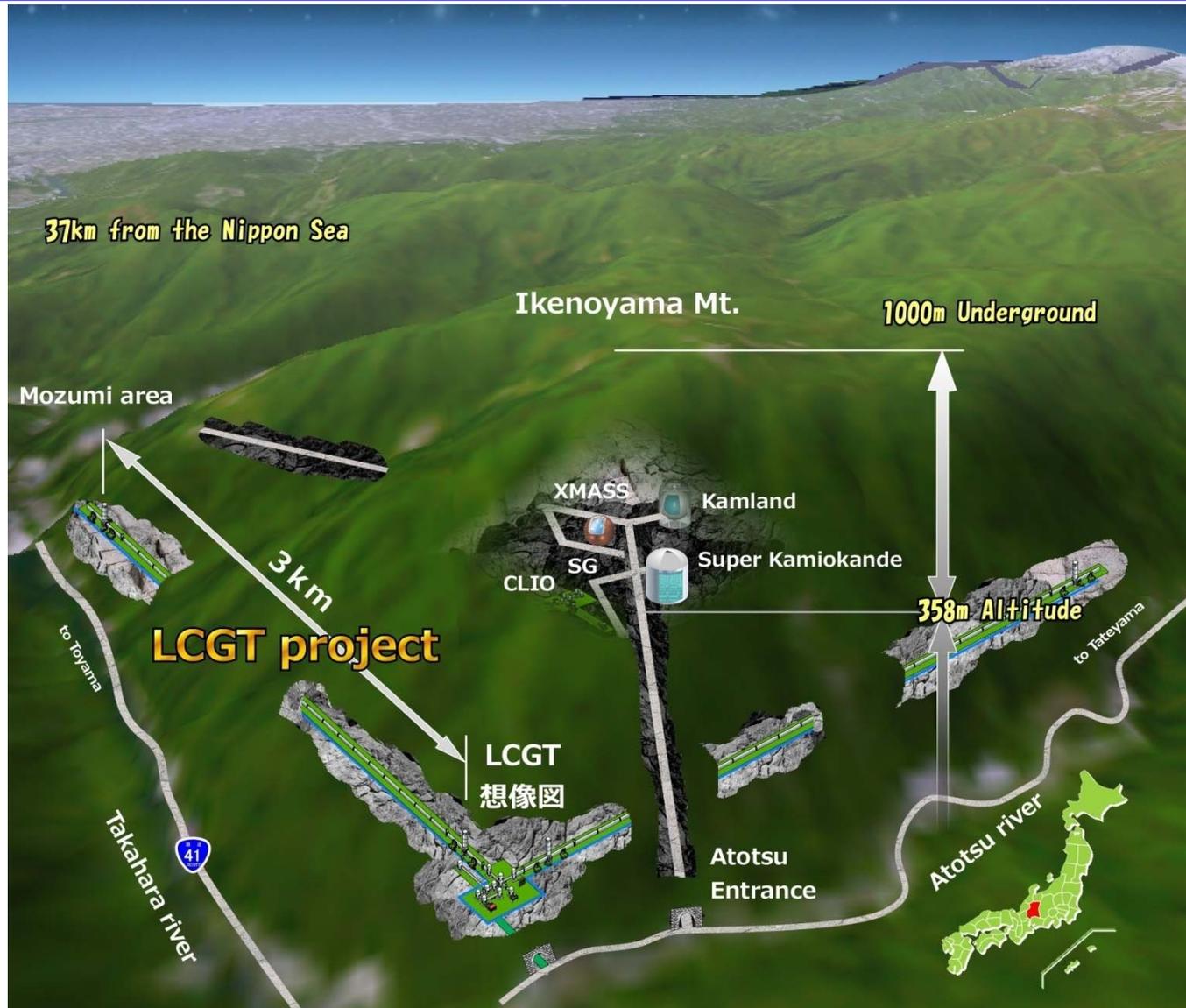
東大宇宙線研, 産総研, AEI, 高工研, 日大, 長岡技科大, 国立天文台, 東大理, 法政・愛工大,
東大地震研, 京大防災研, 京大理, 極地研, 東大海洋研, 筑波大, 阪大理, 大阪市大, JST

日本物理学会
岡山大学
2010/3/22

Contents

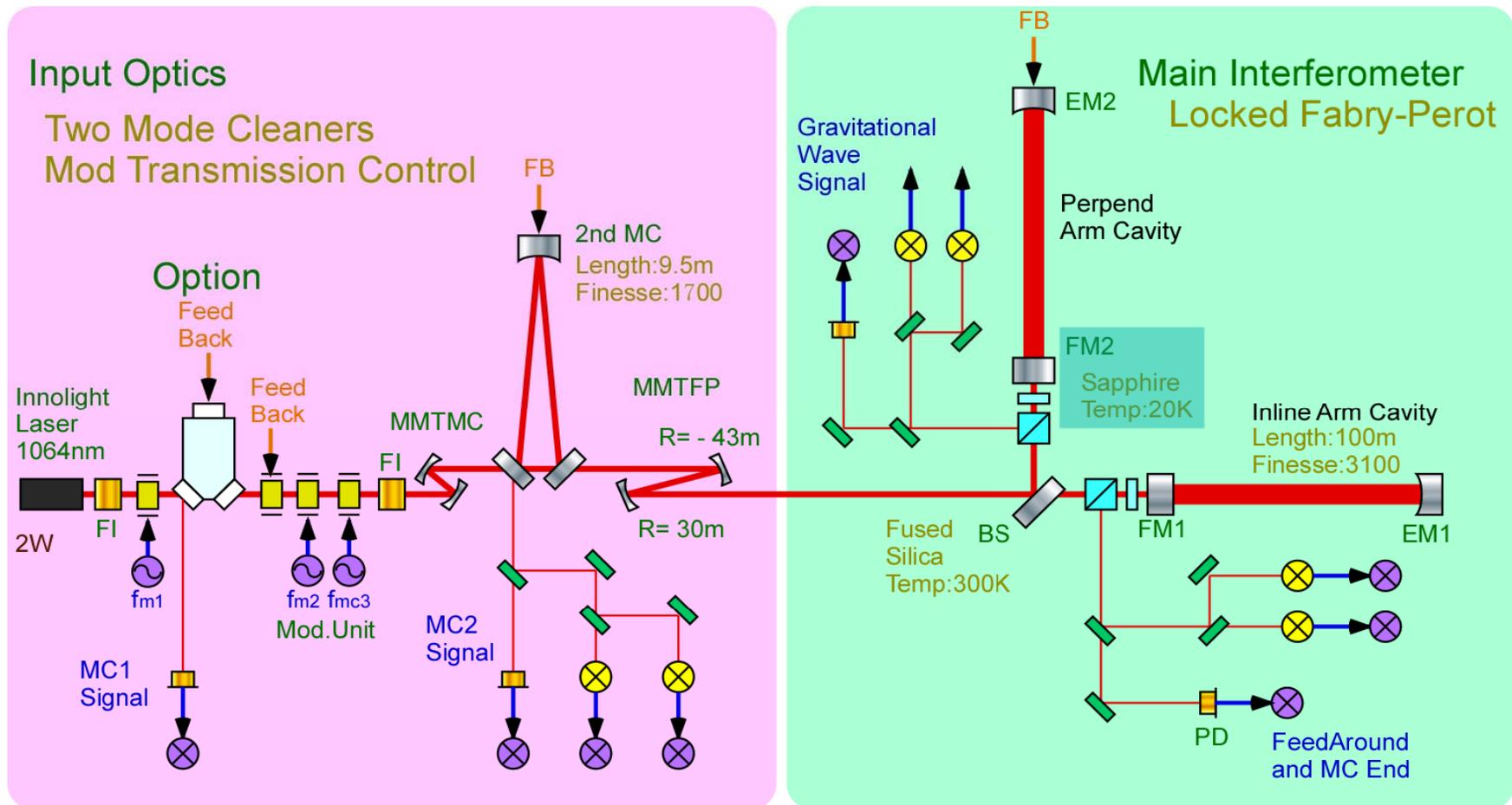
1. CLIOの概略
2. CLIO実験の主要テーマ
3. CLIO実験の経過
4. CLIO低温化実験
 - ① 鏡防振系のEddy Current Damping の Over Damping 問題と改善
 - ② 低温時のCoilと鏡についての強カップリング問題と改善
 - ③ 鏡の低温冷却時の汚染問題と除去
 - ④ 入熱評価(サファイア懸架・熱負荷に耐えられるか?)
 - ⑤ ノイズハンティング(制御回路、発振器位相雑音、100m伝送系)
 - ⑥ サファイア鏡のThermoelastic Noiseの低減は見たか?
5. まとめ

Site



Optical Configuration

-Locked Fabry-Perot Configuration- (Easiest as an IFO)
One arm is used for frequency stabilization.
The other arm is used for GW detection.



CLIO実験の主要テーマ

●低温実験(本発表)

<http://gw.icrr.u-tokyo.ac.jp/clioblog>に日々の格闘が書かれてあるので、興味のある方はどうぞ。投稿用IDも作成します。(ID : clio, Pass : clio2lcgt)

●Local Suspension Point Interferometerの開発(斎藤君の発表)

主目的: 低温・常温ともに機能する振り子の共振の抑制
期待する効果: 鏡の揺れのモニター
鏡の速度の低減による、ロックアクアイヤヤーの補助
SAS低温部の制御
SPIに代わるHeat link系の防振

●Digital systemの導入(宮川君の発表)

LIGOのシステムを導入し、Digital システムを共同開発(MOUを締結)
LCGTへDigital Systemの導入の第一歩

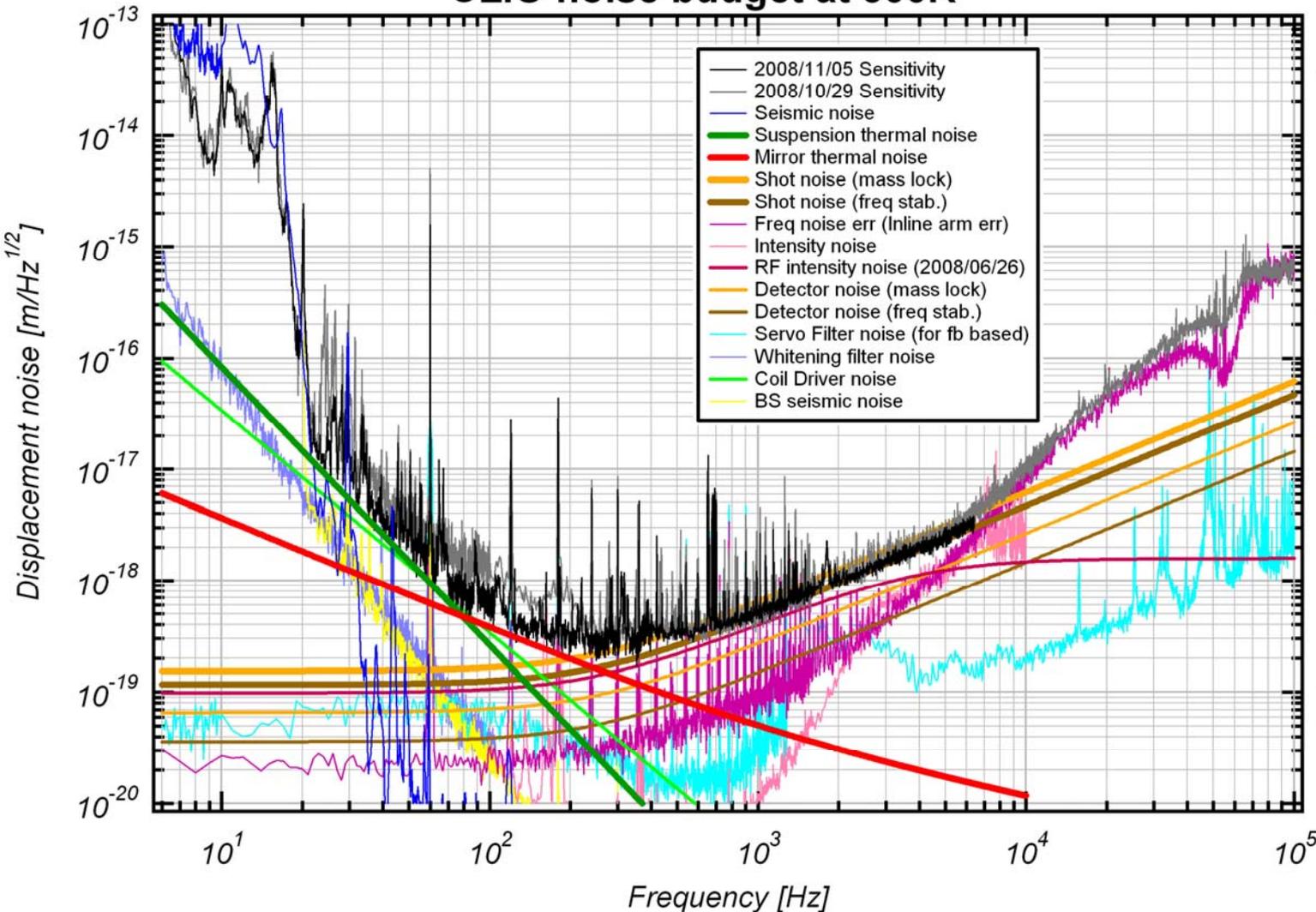
●番外: Macroscopic Quantum Mechanics実験もありえる

Caltech: Yanbeiさんのグループ、早稲田: 宗宮君と協力。

変位感度の雑音要素

- 既知の技術的な雑音は感度以下のはず -

CLIO noise budget at 300K



20Hz付近

Whitening Filterの
雑音が近い。

20Hz~100Hz

“このときは”、
Coil Driver雑音と
振り子の熱雑音が近い。

100Hz~250Hz

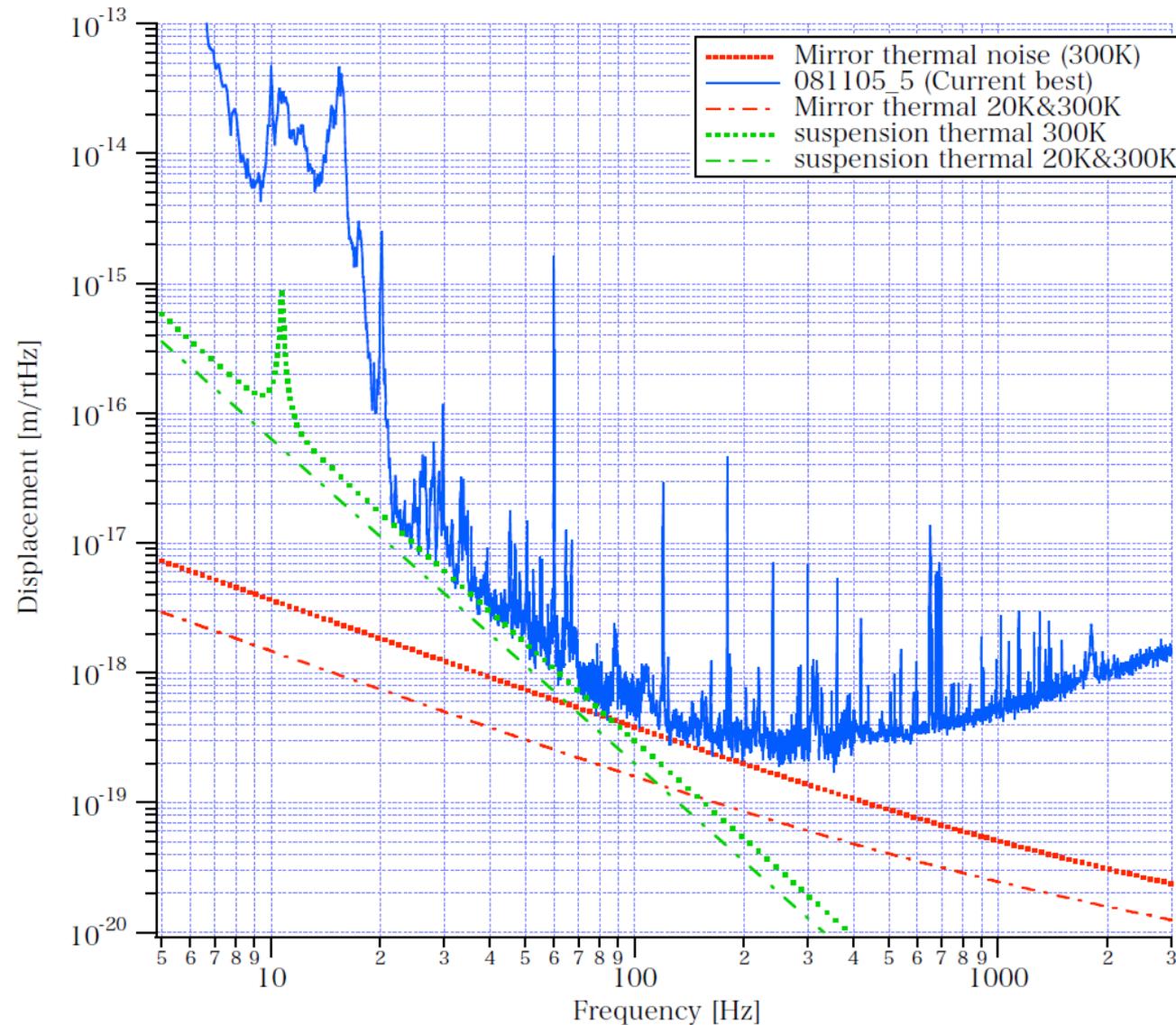
鏡のThermoelastic
Noiseが支配的

250Hz以上

Shot Noiseとレーザ
ーのRF Intensity 雑音
が近い。

CLIO低温実験

- 感度変化予測(ただし、二枚のNear 鏡のみ冷却の場合) -



●振り子の熱雑音は、計算上アルミワイヤーでも、常温レベルから下がることが期待される。

●低温化するときは、トラブル判定を容易にさせるため、1個ずつ冷却するのが今の段階での鉄則。

●Thermoelastic Noiseは、ビーム径のルートに反比例する。つまりNMの方が効く。

以上の見地から、NMのみをまずは、1個ずつ冷却し、低温化の効果を見ることにした。

CLIO低温実験

- 経過 -

●2009/1～できるだけ早く（1.5年以内）低温化の振り子の構成により、常温で見える熱雑音が、低減する事を確認する。（実際始ったのは2009年5月）

- (1) 090517 - 090528 - 090610: Inline near. 振り子の熱雑音低減を再確認。コンタミ。
- (2) 090619 - 090630 - 090701: Inline near. 接触トラブル。
- (3) 090706 - 090724 - 090906: Inline near. 27K.
- (4) 090731 - 090812 - 090906: Per arm near. 初の2鏡冷却。17K.コンタミ。
- (5) 090911 - 090922 - 091121: Inline near. No coil actuator.
- (6) 090911 - 090922 - 091121: Per arm near. No coil actuator.コンタミ。
- (7) 091127 - 091208 - 100117: Inline near. New coil actuator.
- (8) 091129 - 091210 - 091223: Per arm near. New coil actuator.コンタミ。
- (9) 091228 - 100108 - 100117: Per arm near. 接触トラブル。
- (10) 100122 - 100203 - : Inline near. New magnet damping. 17K. 低温維持中。
- (11) 100122 - 100202 - : Per arm near. New magnet damping. 16K. 低温維持中。

CLIO低温化実験(1)

- 鏡防振系のEddy Current Damping の Over Damping 問題 -

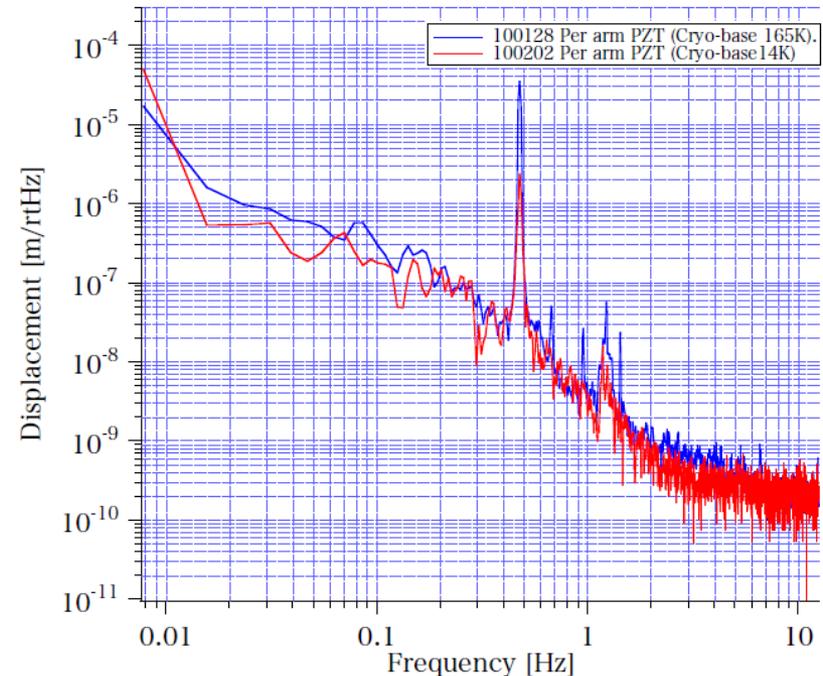
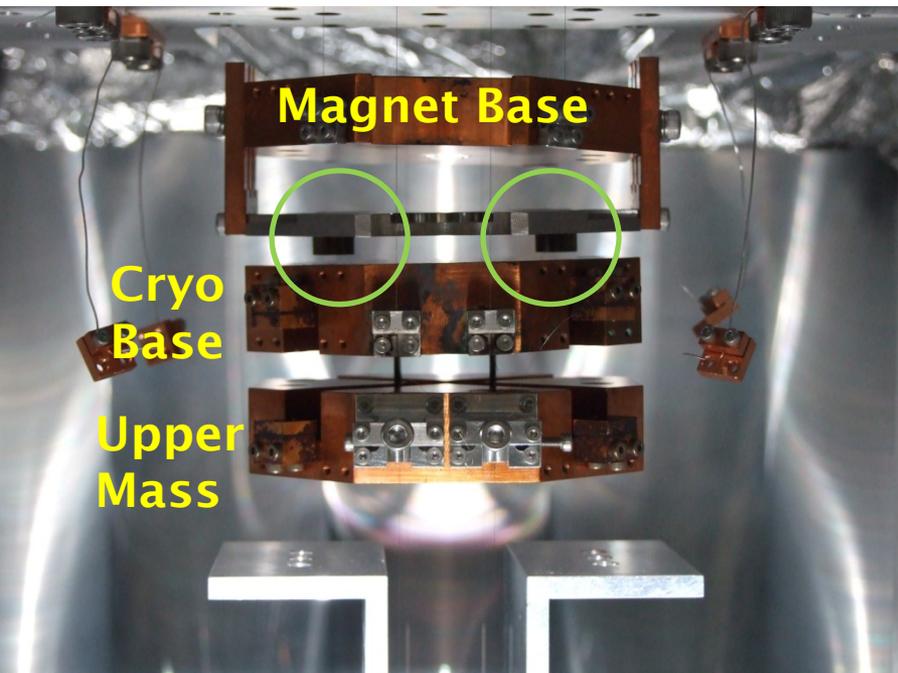
(問題点)

Cryo-Base部 (銅製) は磁石ダンプされているが、低温時の電気抵抗の著しい低下で、Magnet BaseとCryo Baseが強結合状態になり、Over Dampingになっている。

(本解決策)LSPIによるダンピング。ちょっと間に合わなかったので・・・

(臨時の解決策)常温では、ダンピングがかからないほど磁石を弱める。

2個×Φ3×4mmに交換。



CLIO低温化実験(2)

- Coil経由のLine 雑音の低減-

(問題点) 前回の学会でも途中経過報告しましたが・・・

Heat Linkが少ないにもかかわらず、Line雑音が多い。

(予 想)

Cryo BaseのEddy Current Damping の Over Damping 問題と同様に、銅製のコイル自身の「断面」と鏡についている磁石との間にも、低温化によるコイル銅線（一般的な被服銅線）電気抵抗の著しい低下によるカップリングの増大があるのでは？

それにより、インナーシールドに設置したコイルの振動が直接鏡を動かしている？

(確 認)

日本大学の新富先生のところで被服銅線のRRR値を測定→200くらい。この量だと、予想を可能にする。

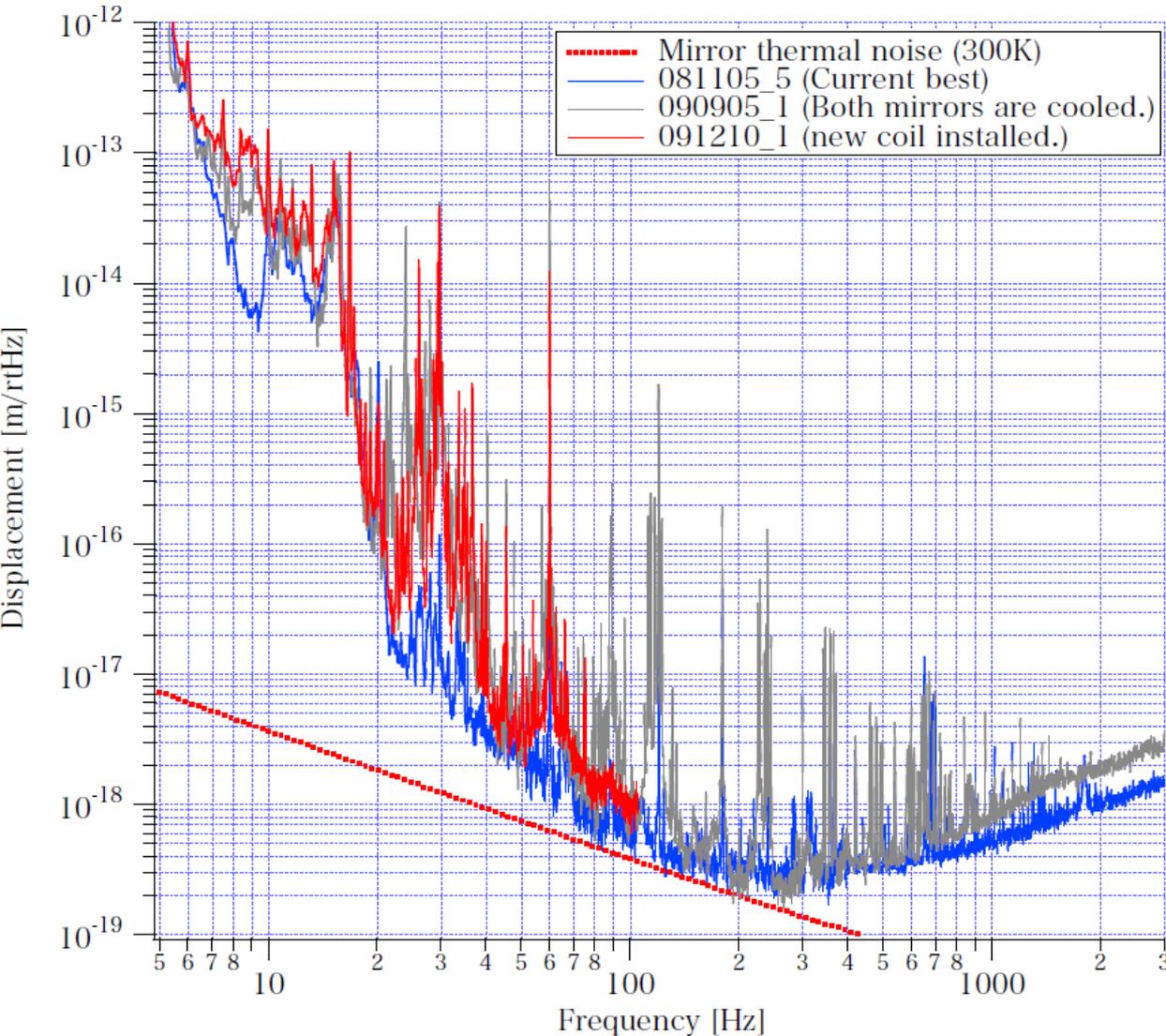
(対 策)

コイルの線を、低温化によっても抵抗の変化しにくい「りん青銅」に交換。



CLIO低温化実験(2)

- Coil経由のLine 雑音の低減 -



特に100Hz以下で、Line雑音が大きく低減した。

CLIO低温化実験(3)

- コンタミの解消 -

(問題点)

PerNMのみ、冷却により共振器反射率が悪化する。
それと同時に、**高周波の感度が明らかに悪化。**

(Q-mass測定結果)
Per 100m arm + Per NMの時

(調査)

インナーシールドのジャケットからの高分子系アウトガスを疑い、ガス分析装置で成分調査。

PerEM, Per 100m arm, PerNMの3領域のPer 100m ArmにQ-massを設置し測定した結果、PerNM結合時のみ、N=14,28が増大。つまり、窒素が増えている。つまりリークしている！！

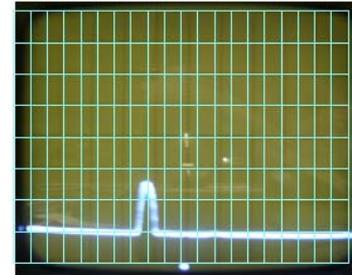
(解決)

- ① PerNMのO-ringがダメージを受けていた。交換。
- ② 以前から、Per NMのターボのGV付近からリークがあったのを思い出す。GVの撤去。

以上によりFinesse 3000レベルでの顕著な鏡汚染は、共振器反射率や透過率の悪化という形ではみられなくなったが・・・。

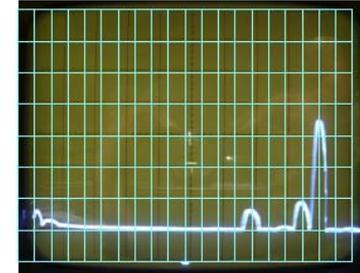
Sensitivity
 10^{-9}

21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40



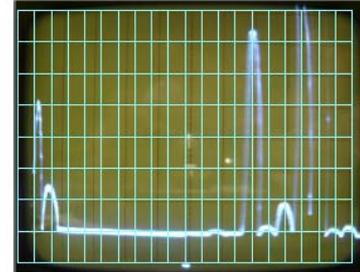
Sensitivity
 10^{-10}

00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

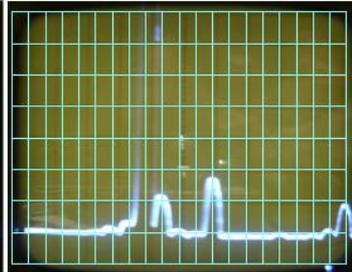


Sensitivity
 10^{-11}

00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20



21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40



CLIO低温化実験(4)

- 入熱の抑制とその評価 -

inline arm near:

Heat link clamp point, 10.97K.

1 × $\Phi 0.5 \times 315$ mm, RRR2300, high purity Aluminum wire.

heat from cryo-base, 32.00mW.

cryo-base, 14.42K.

1 × $\Phi 0.5 \times 115$ mm, RRR2300, high purity Aluminum wire.

heat from upper mass, 24.92mW.

upper mass, 15.48K.

4 × $\Phi 0.5 \times 400$ mm, RRR2300, high purity Aluminum wire.

heat from mirror, 24.92mW.

Mirror, 16.45K <- estimation.

per arm near:

Heat link clamp point, 11.15K.

1 × $\Phi 0.5 \times 315$ mm, RRR2300, high purity Aluminum wire.

heat from cryo-base, 28,78mW.

cryo-base, 14.25K.

1 × $\Phi 0.5 \times 115$ mm, RRR2300, high purity Aluminum wire.

heat from upper mass, 20.94mW.

upper mass, 15.13K.

4 × $\Phi 0.5 \times 400$ mm, RRR2300, high purity Aluminum wire.

heat from mirror, 20.94mW.

Mirror, 15.92K <- estimation.

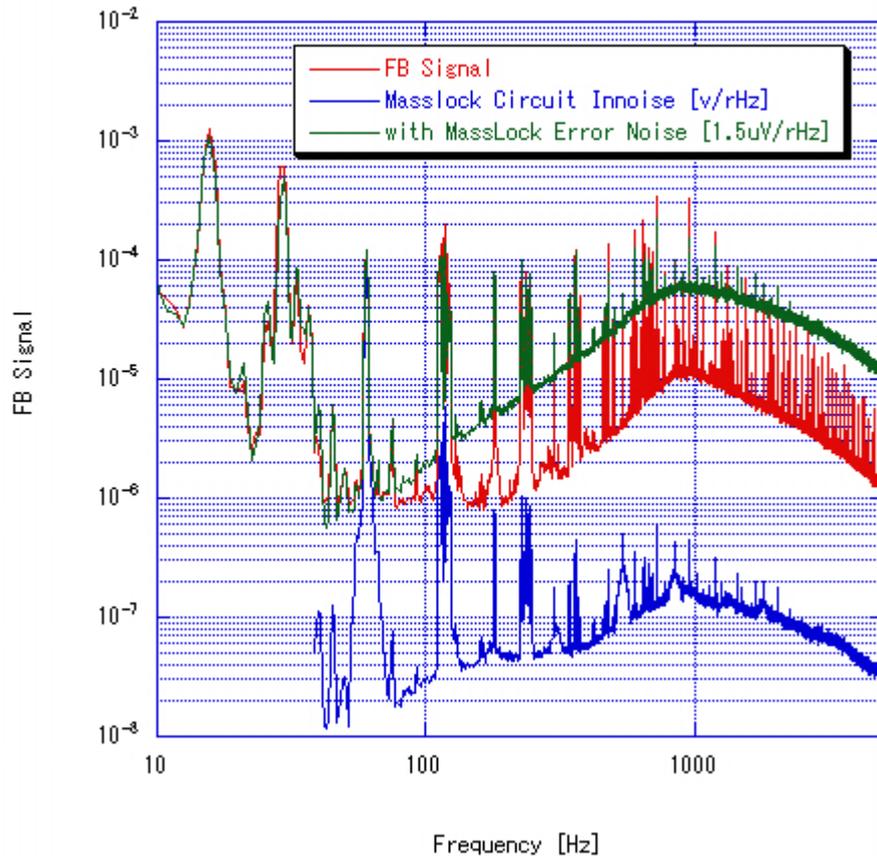
両鏡とも、ほぼ、サファイアファイバー懸架のボーダーライン22mW周辺まで下がっている。
この入熱量でもサファイアファイバー(d=125um)で冷却出来た場合、鏡の温度は約35Kになる。
35Kでの鏡の熱雑音は100Hzで 4×10^{-20} m/rtHz以下で本実験の目標を満たす。

CLIO低温化実験(5)

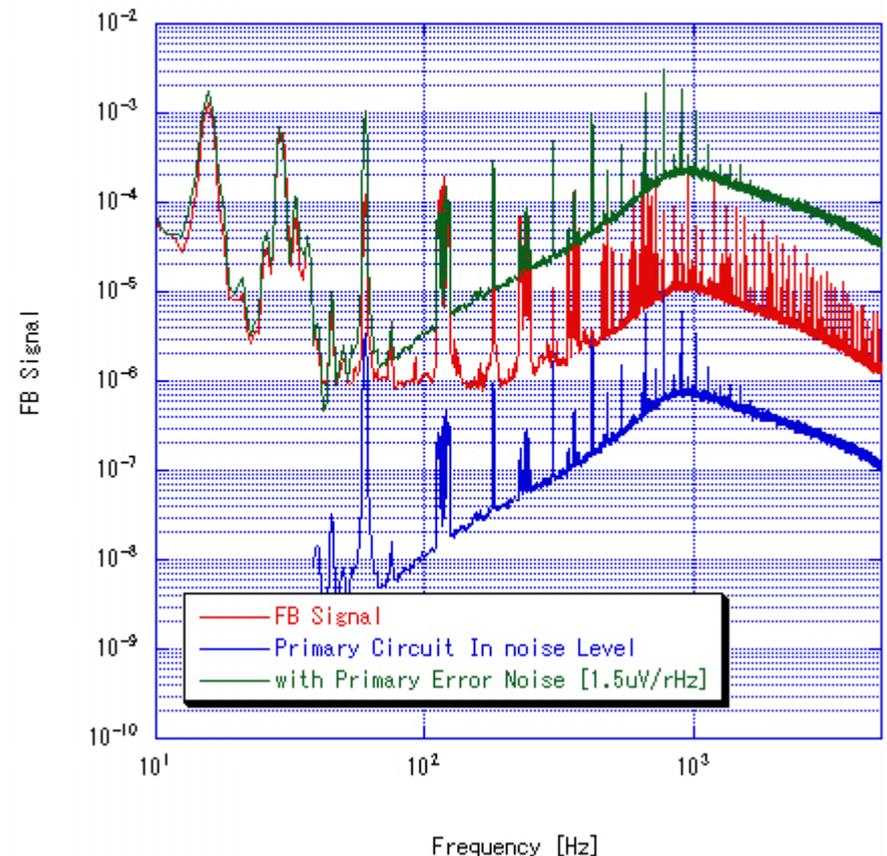
- Noise Hunting: 電気回路 -

制御回路系の入力換算雑音・・・問題なし

Secondary Servo Circuit In-Noise in Sensitivity



Primary Servo Circuit In-noise in the Sensitivity

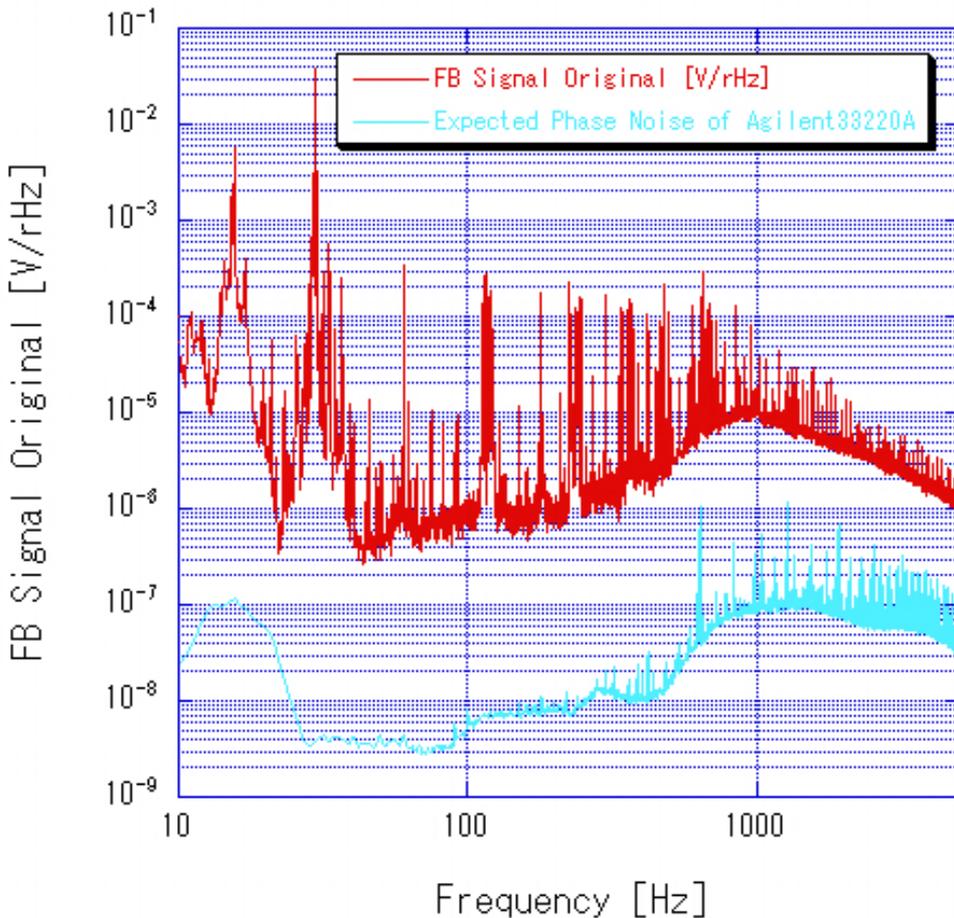


CLIO低温化実験(5)

- Noise Hunting: 発振器位相雑音 -

Agilent 33220A Function Generatorの位相雑音・・・問題なし

Phase Noise of
Agilent 33220A Function Generator



●Agilent33220A Function Generatorの位相雑音は、より位相雑音の小さいAnritsu MG3690Bを参照にし、直交復調法で計測。

●位相変調 → 感度、位相変調 → 位相雑音の伝達関数をとって、位相雑音 → 感度を求める。

◆他にも、100Hzに既知の位相変調をかけ、その位相雑音におけるピークと位相雑音フロアーレベル、感度におけるピークの関係から、感度における位相雑音フロアーレベルを計算。

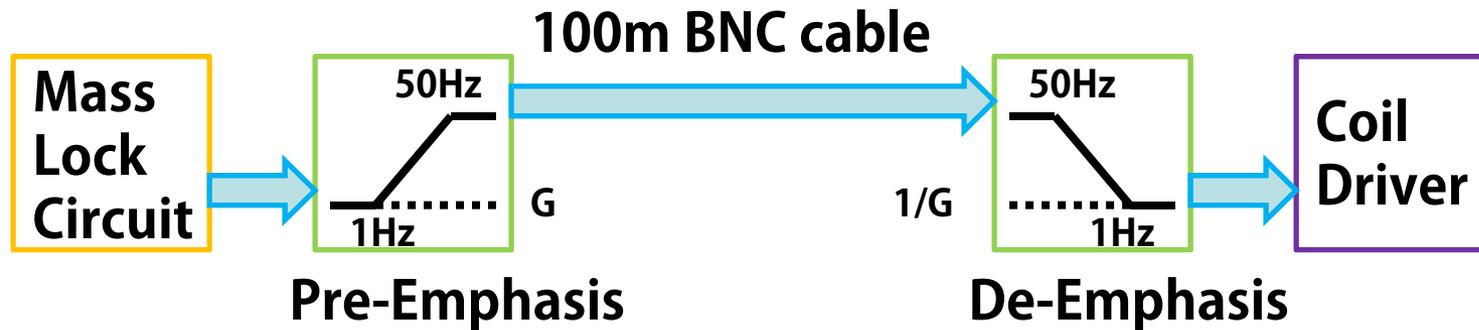
CLIO低温化実験(5)

- Noise Hunting: 100m電送系 -

100m伝送系で雑音を拾っていないか?・・・問題なし

(setup)

Inline Endでマスロックしているので、マスロック回路の出力(Center Room)をPre-Emphasisに通し、100m伝送し、Inline EndでDe-Emphasisに通し、コイルドライバーに入力する

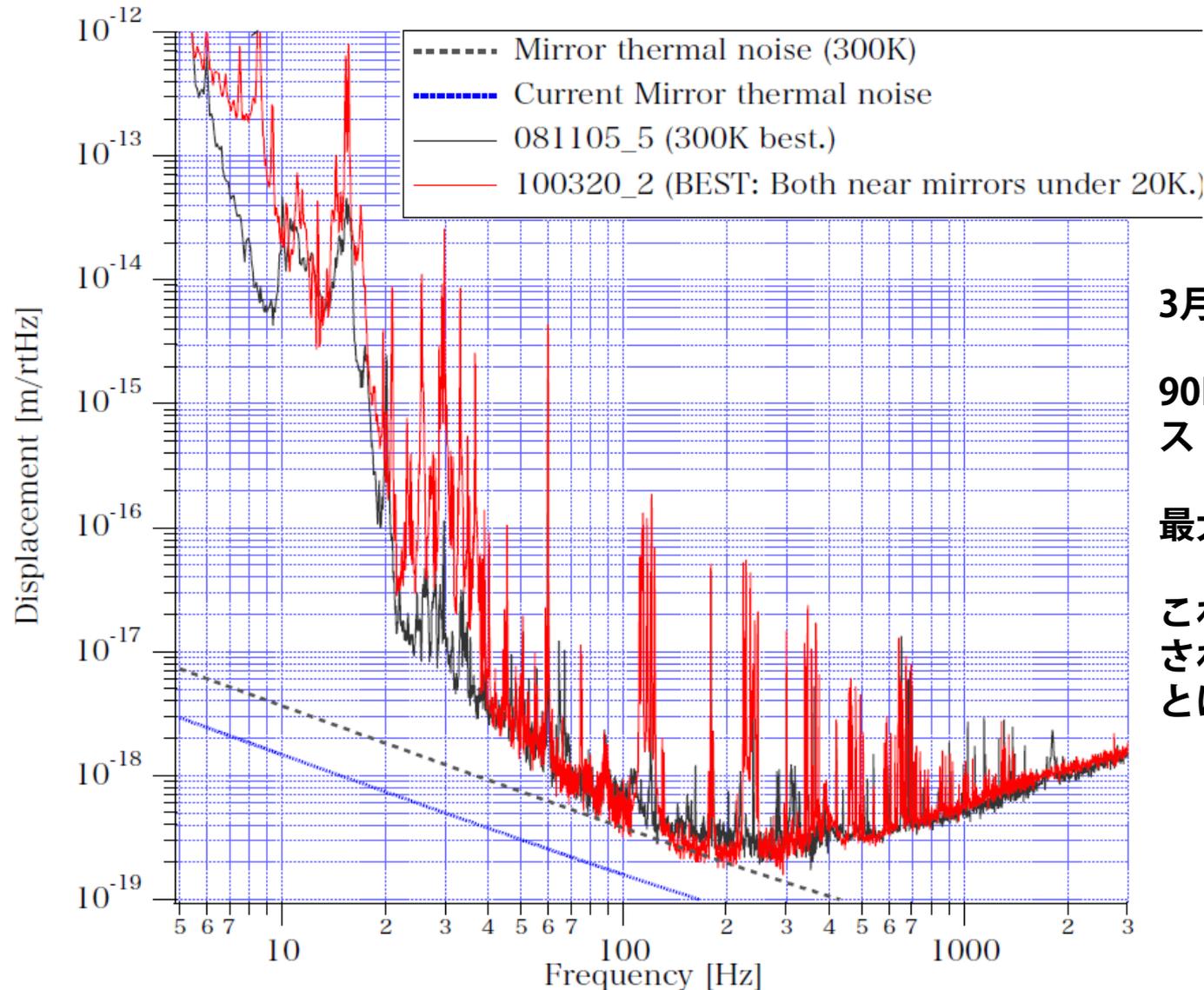


(結果)

- ① G が8だとロックがかなり厳しい。3だと大効率コイルでロック可能。
- ② ベスト感度（それに近い状態）の時に試したが、感度に変化がないか、ちょっと悪化。

CLIO低温実験(6)

- Thermo-elastic Noiseの低減は見たか？ -



3月20日 (土曜日)

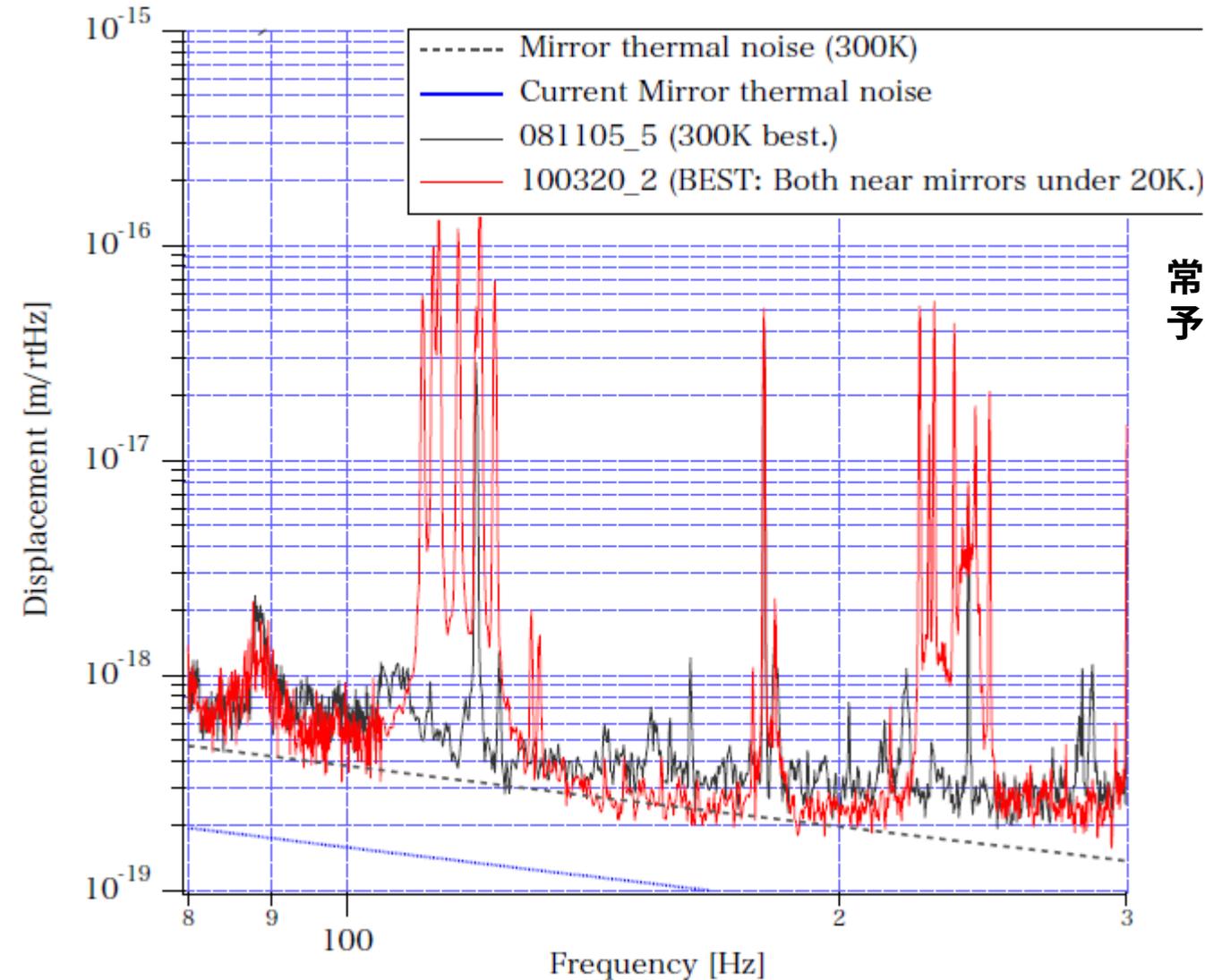
90Hz~200Hzの間で、常温ベスト感度を更新。

最大で~1.5倍改善。

これは、高低周波側から外挿される雑音の影響を考慮するとほぼ予測に近い改善値。

CLIO低温実験(6)

- Thermo-elastic Noiseの低減は見たか？ -



常温でのThermoelastic雑音の
予想値を下回る部分がある！

CLIO低温実験(6)

- Thermo-elastic Noiseの低減は見たか？ -

感度の計算
$$L = T_{SUS} \frac{1}{T_{WF}} \frac{1+G}{G} V_{FB}$$
 V_{FB} : Feedback電圧

T_{SUS} : End振り子駆動伝達関数モデル
(実測に基づいてモデル化)

$$2.1 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1.0}{f} \right)^2 \text{ [m/V]}$$

この実験以前で使用したファターは2.09
中心値の差ほぼなし
フィット誤差は5%

$\frac{1+G}{G}$: 制御ループゲイン補正 (実測)

感度がベストでない3月の測定時と、3月20日のベスト感度取得の時と同じ。
中心値の差はほぼなし
フィット誤差は5%程度。

T_{WF} : Whitening Filterの伝達関数
(実測)

回路系で、かつ接続は変化してないので、変化してない考える。

かつ、感度取得環境(騒音など)も特に変化してない。
よって、感度の変化し、Thermoelastic Noiseが減ったと推察される。

CLIO低温実験(7)

- 改良したい点 -

- ショットノイズ: 理論値まで到達していない。
達すると、よりはっきりThermoelastic Noiseの低減が見える。

(対策案)

- レーザーの状態が悪いので、それを修正。
- Pre-MCを導入する。

- 40Hz~90Hzの感度が、常温の時と同じなのはなぜ？

(対策案)

- ビームセンターリングがZしかできないので、横もできるようにする。
- アルミの振り子の熱雑音が予想通り下がっているか検証する。

- 実は、3月7日時点の感度では、不満点がさらに3個あったのだが、3月20日に改善された。

まとめ

- サファイア鏡の冷却によるThermoelastic Noiseの低減確認実験を、NM二個を冷却する形で行ってきた。
- 懸架系、グラウンド系、伝送系の改良、及び、Noise Huntingの結果、2009年秋の学会の時に得られたNM二鏡冷却時にみられた様々なLine雑音の低減、及び、ハムの低減がなされた。
- 2010年3月20日に、90Hz~200Hz付近の感度が、想定された量である約1.5倍程度改善されたことが確認され、これは鏡の低温化によるThermoelastic Noiseの低減の効果と思われる。
- さらに低減確認のため、問題点を洗い出し、対策案を試行する予定。

俳句甲子園



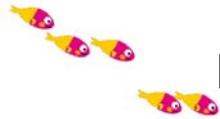
□ Seismic Noise



□ Thermal noise of mirrors and mirror suspensions



□ Laser intensity, frequency, scattering, beam jitter.



□ Residual gas



□ Shot noise, etc



Noise or GW?

