

# 神岡での重力波観測

発表者：三代木伸二  
(ICRR, JST)

内山隆, 宮川治, 齊藤陽紀, 我妻一博, 大橋正健, 黒田和明, 中谷一郎  
/ 寺田聡一/山元一広  
(ICRR, AIST, MPQ)

都丸隆行, 鈴木敏一, 春山富義, 佐藤伸明, 山本明 / 新富孝和  
(KEK, 日本大学)

三尾典克, 大前宣昭, 森脇成典, 野中理  
(東大新領域)

新井宏二, 辰巳大輔, 高橋竜太郎, 川村静児, 藤本眞克,  
(国立天文台)

and

CLIO collaborators

ICRR Inter-university Research Presentation  
2008/12/19

# H20年度のテーマと予算

## - 大橋(ICRR) -

神岡での重力波観測(VII)(¥800,000)

## - 三代木(ICRR) -

重力波アンテナのデジタル制御技術とデータ解析技術の開発(III)(¥500,000)

## - 三尾(東大新領域)-

CLIO干渉計用高出力光源の開発(¥700,000)

# Contents

- CLIO 概略 -
- 2008年度のCLIO実験の成果 -
  - (i) 常温運転における感度向上  
(常温熱雑音に到達)
  - (ii) PSR J0835-4510からの重力波観測  
(阿久津朋美さんの博士論文)
  - (iii) CLIO干渉計用高出力光源の開発
- New CLIO Collaboration -
- Summary -

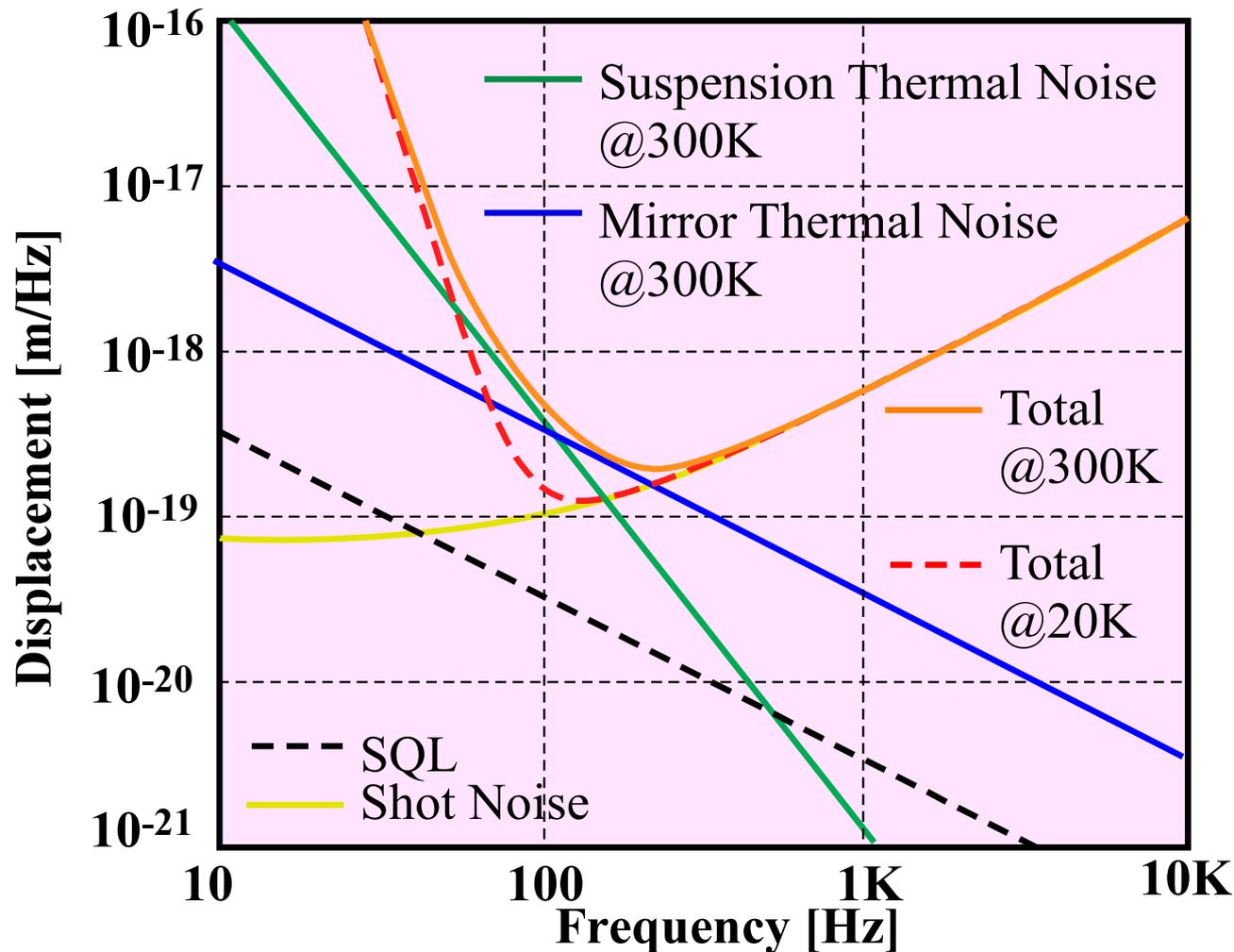
# CLIO Overview

- 100m base-line Locked-FP style Proto-Type for LCGT.
- CLIK(2000-02)におけるクライオスタット開発と低温干渉計基礎制御, LISM(1999-2002)における低周波感度の向上と安定動作・重力波観測実験, KEK低温センター(1996-2006)における、低振動冷凍機開発の集大成.
- レーザー干渉計重力波アンテナの感度を制限する熱雑音を鏡の冷却により低減し、感度を向上させることを目指す.
- 神岡の地下における、低振動・安定環境を利用した、重力波観測を目指す.

# Site



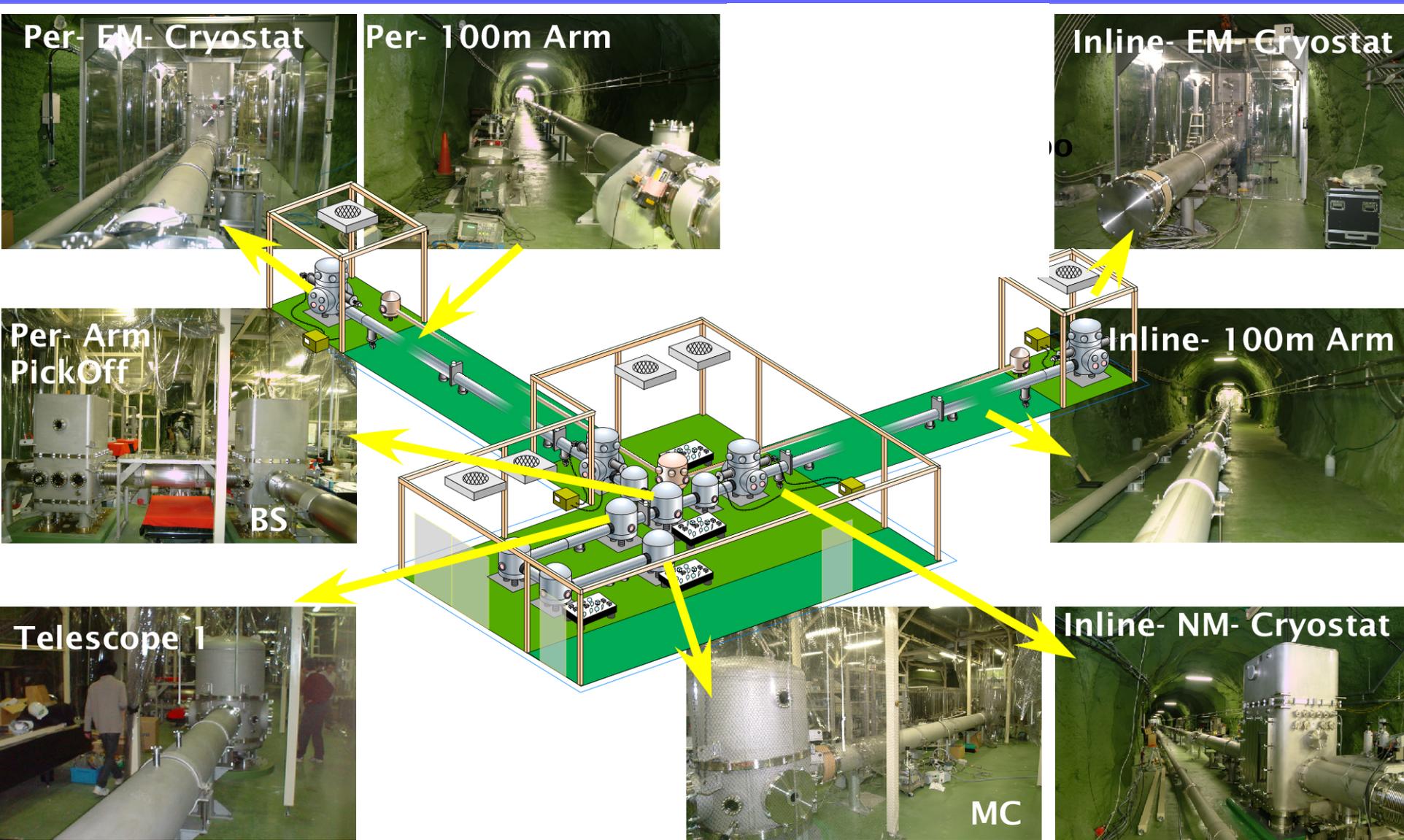
# 初期の熱雑音の観測と低減の戦略



**Laser power :**  
*250mW for one arm*  
**Mirror Mass :**  
*1.8 kg*

*Thermal Noises limit the sensitivity around 100Hz, and they will be reduced after cooling.*

# CLIOの外観



# Process from CLIO to LCGT

## ●2008/4~2008/12

常温で熱雑音が見えるところまで行くこと。

その熱雑音が出現する範囲は、

①100Hzから300Hzの間は、鏡の熱雑音(Thermo elastic Noise)

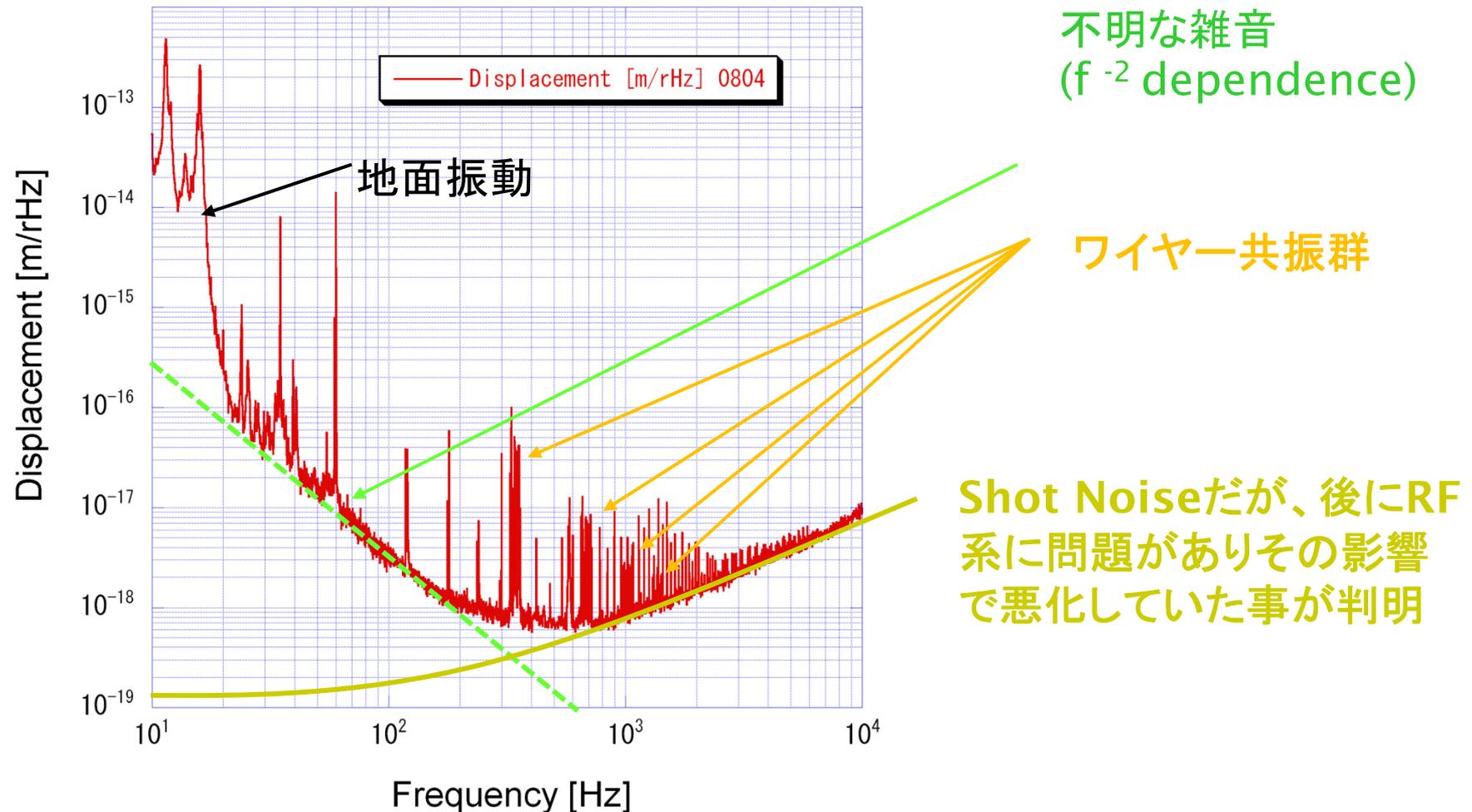
②100Hz以下は、鏡のピッチ振動が、それがビームセンターリングの不整合で光軸方向に漏れているもので支配されやすい。それが十分落とせると、Q値が予想より悪ければ、振り子の熱雑音が見える。

## ●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。

# 2008年4月の変位感度と雑音要素

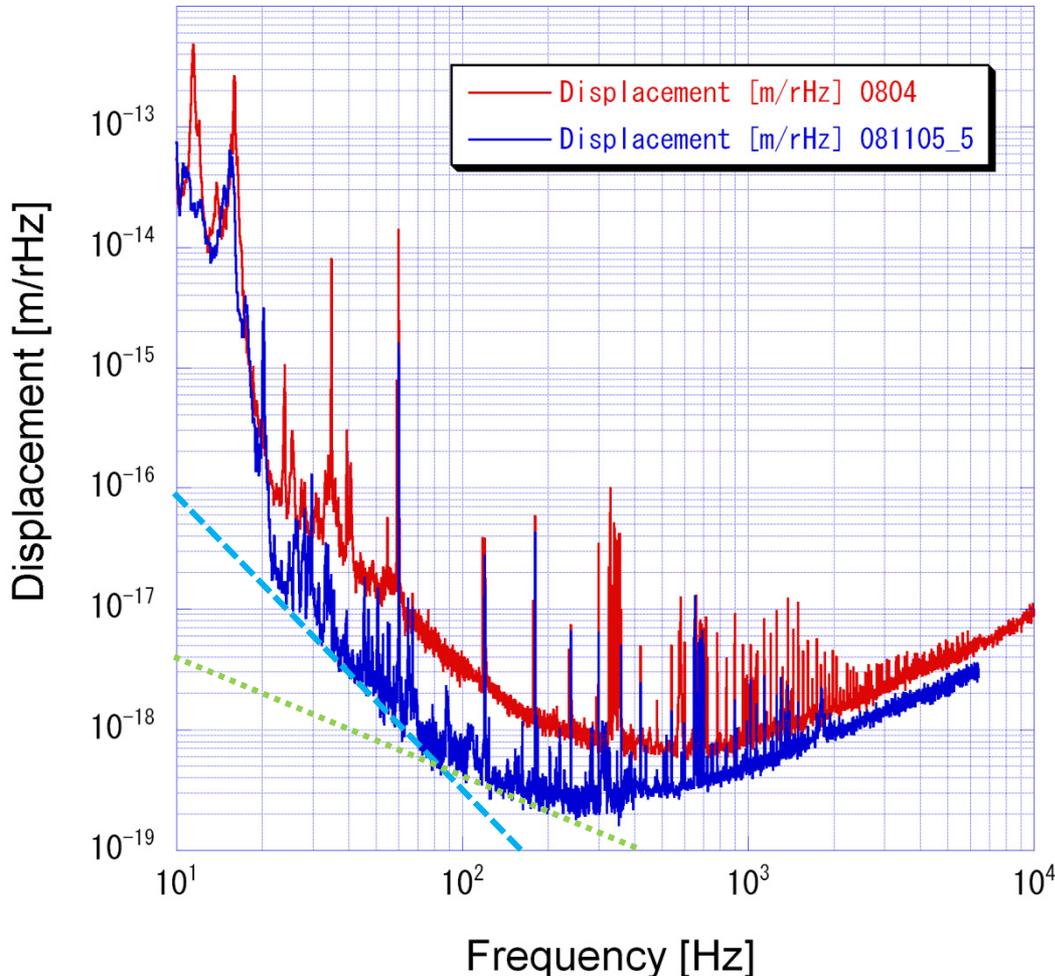
## CLIO Displacement Noise in 2008 April



# 2008年11月の変位感度

- 常温の熱雑音レベルに到達 -

## CLIO Displacement Noise Improvement from April/2008 to December/2008



●ワイヤーをより細いものに変更し、ワイヤー共振群を感度の一番いいところからずらした。(同時に低周波見積もり感度がより下がる。このおかげで鏡の熱雑音が見えやすくなった。)

●400Hz以上でRF関係の雑音を特定し、Shot雑音に到達。

●400Hzから20Hzまでの雑音を特定し、除去。

(天文台川村さんの1日の助言で半年間の謎が解ける)

さらに

●400Hzから20Hzまでで、ビームセンターリングで、ピッチ振動起因の雑音を低減。

●鏡の常温熱雑音に接近(青点線)。

●20Hzから70Hzも振り子のピッチか振り子の熱雑音の可能性大(緑点線)。

# 感度向上の最後の壁：熱雑音1

- CLIOで見た鏡防振振り子の機械的Q値の悪化 -

## ● Eddy Current Dampingによる振り子の熱雑音

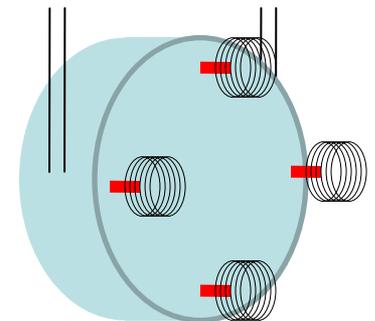
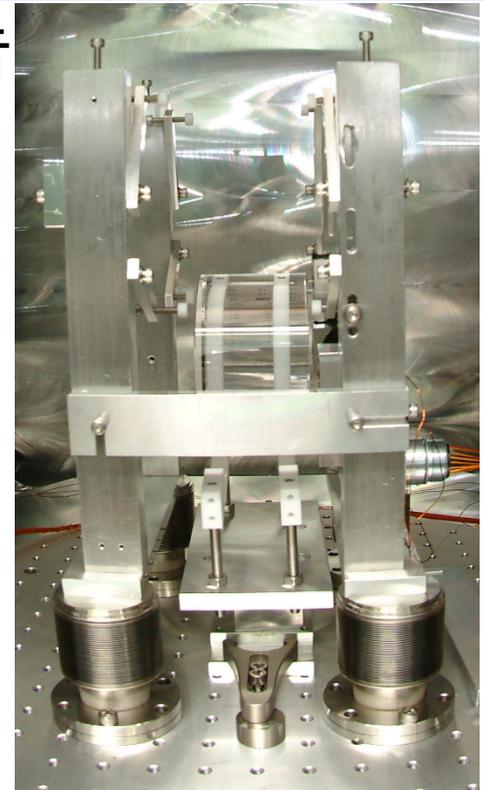
- 100mFP共振器 (Finesse 3140 ←  $R=0.999000 \pm 20$  ppm) の共振維持のために鏡の位置の精密制御が必要。

- 重力波業界では、磁石を鏡に接着し、かつコイルを対向させ、コイルに流す電流によって発生する磁場の制御で鏡の位置制御を非接触に行っている。磁石は、この時、直径2mm長さ10mmのネオジウム磁石。鏡の質量は1.8kg。

- CLIOでは、鏡周辺は低温(構造体：~10K、鏡は20K)に冷却する必要があるため、コイルのホルダーにも純アルミを使用していた。

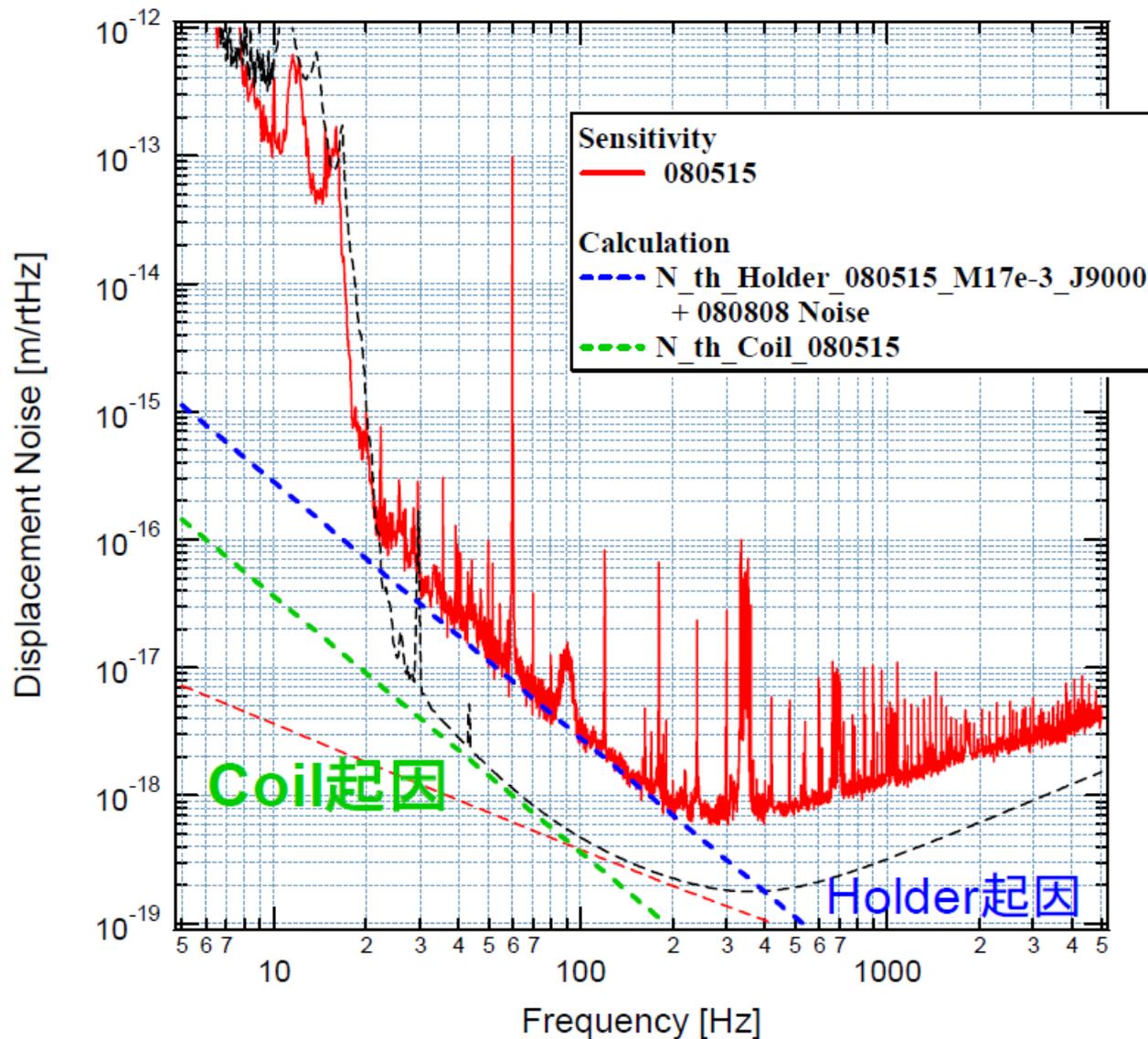
- ホルダーとしての純アルミが磁石に近すぎたため、その磁石の磁場により、アルミホルダー内にEddy Currentが流れ、結果的に、鏡の動きをDamping(つまり、損失を付加)し、振り子の機械的なQ値を低減させていた。

- ちなみに、この物理現象は、逆の立場から「アルミのホルダーに、そのアルミの抵抗に起因するジョンソン(電圧)雑音が発生し、それにより流れる円電流によって発生した磁場により鏡が揺らされた」と表現することも可能である。



# 感度向上の最後の壁：熱雑音1

- 理論との比較 -



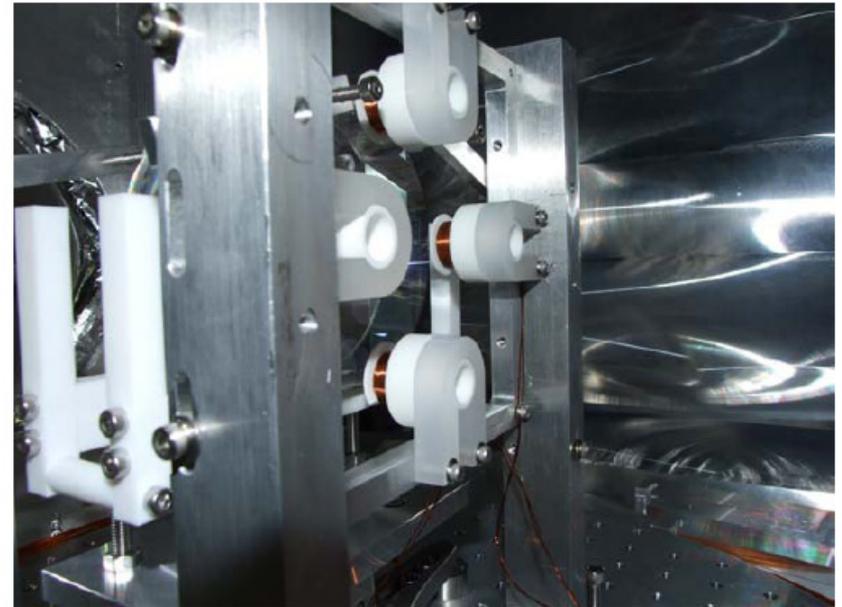
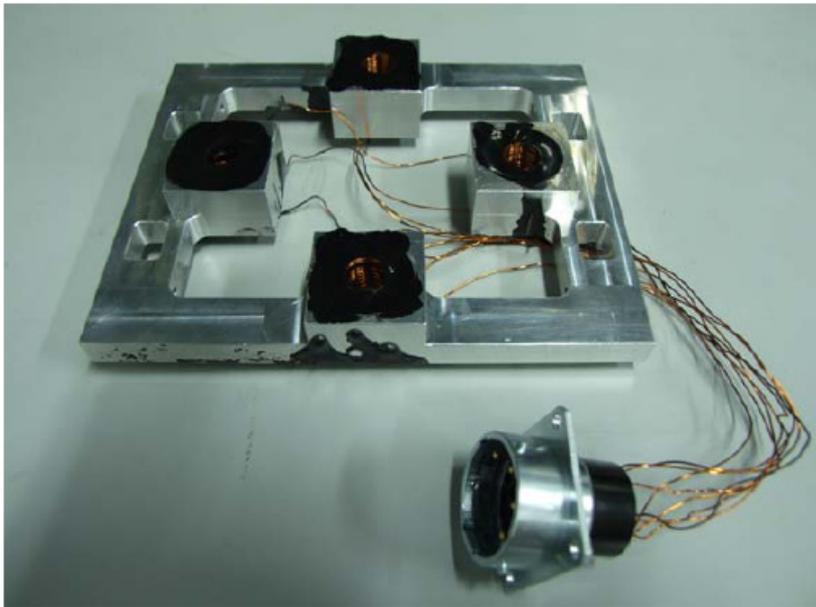
● 理論予測と結果が、ほぼ一致。

# 感度向上の最後の壁：熱雑音1

- 検証実験 ①：コイルホルダーを非金属に変更 -

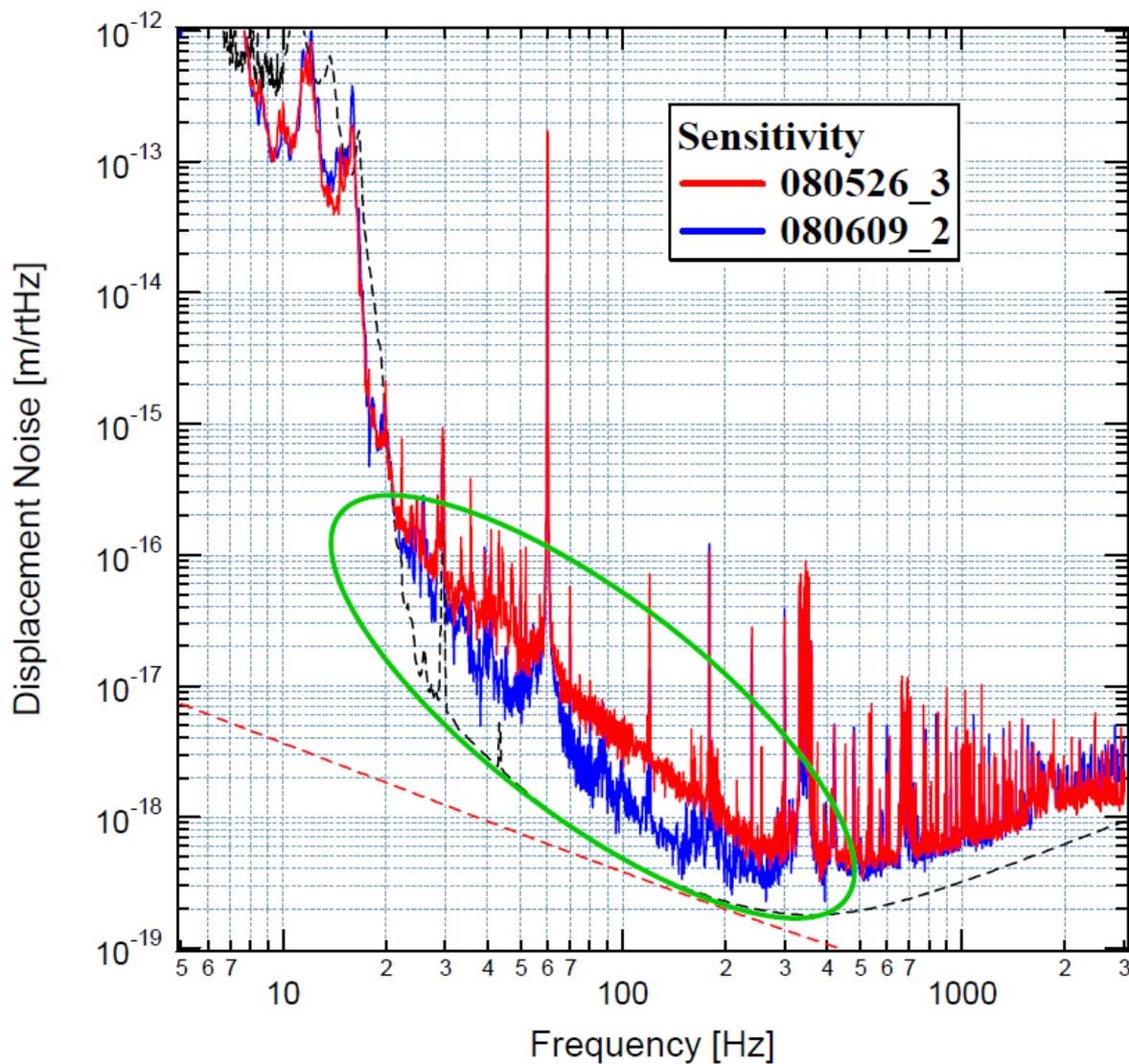
## 検証①

コイルホルダーを「アルミ」から「マコール(セラミック)」と「ダイフロン(樹脂)」に変更。  
(低温化のためには、そこそこ熱伝導性のあるものが必要があるが、今は検証ということで..)



# 感度向上の最後の壁：熱雑音1

-検証実験 ①：感度の向上-



●確かに、感度が向上した。

●向上した結果の感度が何  
で支配されているかはこ  
の時点では不明。

# 感度向上の最後の壁：熱雑音1

-検証実験 ②：渦電流による振り子のQ値の低下と熱雑音の理論-

● Eddy Current Dampingによっておこる振り子の機械的Q値の影響の理論的考察  
揺動散逸定理から導かれる、速度ダンピングの場合の振り子の熱雑音  
(我妻一博君(D2)の仕事)

$$F = \alpha I$$

$$V = \alpha v$$

$$G = \frac{4k_B T \omega_0}{m \omega^4 Q} \sqrt{G} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

F: 鏡に加わる外力[N/A]

Z: コイルと外付け抵抗のインピーダンスの和

N: 磁石コイルペアの個数

m: 鏡の質量[kg]

Q: 振り子の機械的Q値

G: パワースペクトル[m<sup>2</sup>/Hz]

$\alpha$  は Coil-magnet actuator の Coupling 率 [N/A]

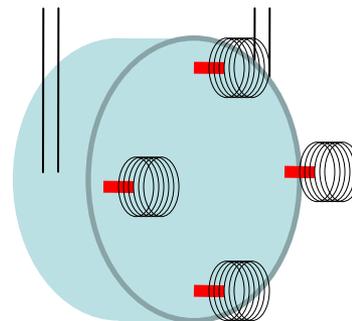
$$m(-\omega^2 + \omega_0^2)\tilde{x} = N\alpha\tilde{I}$$

$$Z\tilde{I} + i\omega\alpha\tilde{x} = 0$$

$$m(-\omega^2 + \omega_0^2)\tilde{x} + i\frac{N\alpha^2\omega}{Z}\tilde{x} = 0$$

$$Q = \frac{m\omega_0 R}{N\alpha^2}$$

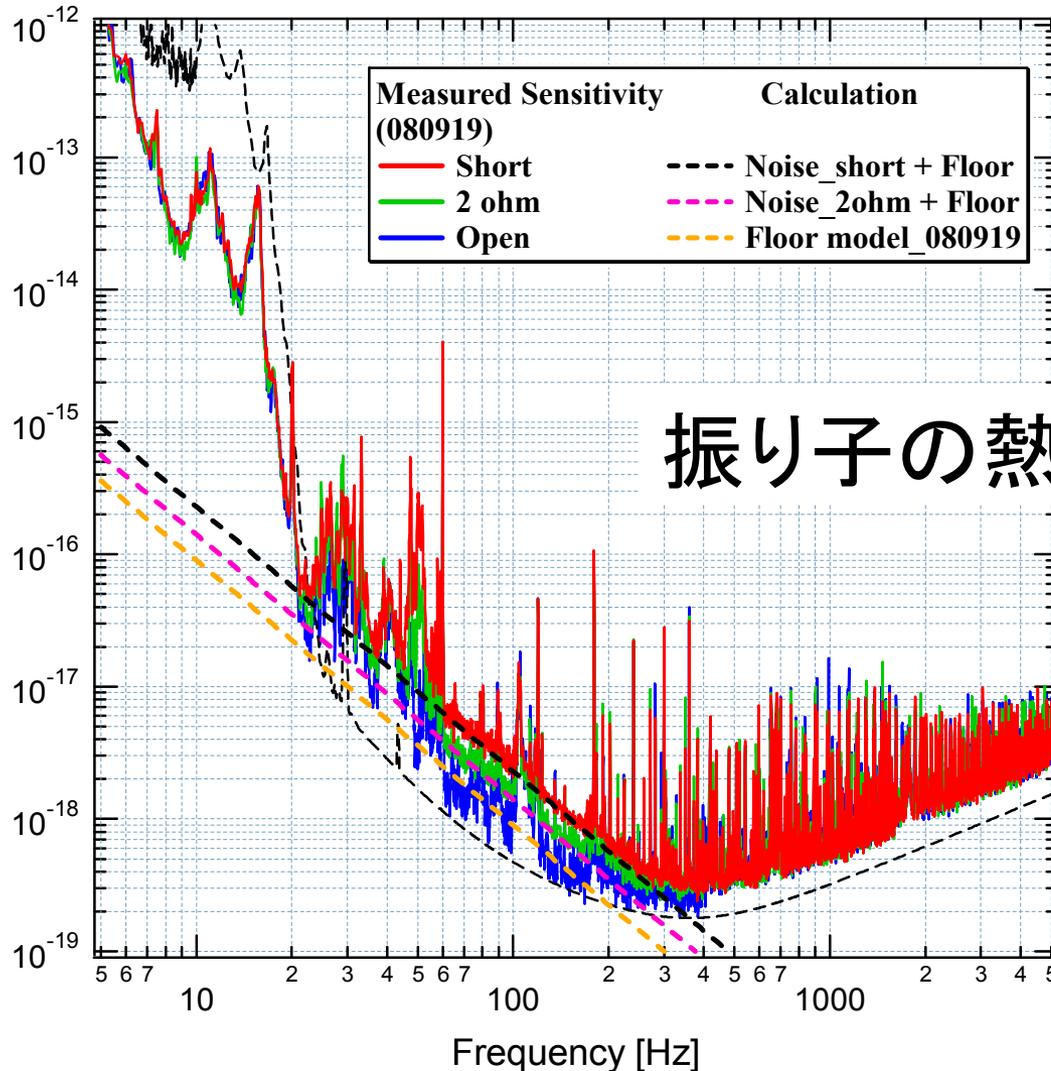
$$G = \frac{4k_B T N \alpha^2}{m^2 \omega^4 R}$$



コイル回路の抵抗調整で、Eddy Current量を調整＝振り子のロスの調整 (Short・2Ω・Open)

# 感度向上の最後の壁：熱雑音1

- 検証実験 ② : 振り子の熱雑音 -



予想ノイズレベル@100Hz

Short :  $2.3 \times 10^{-18}$  [m/rtHz]

2 Ω :  $1.5 \times 10^{-18}$  [m/rtHz]

Open :  $1 \times 10^{-18}$  [m/rtHz]

振り子の熱雑音が見えた！

Wide bandでの比較

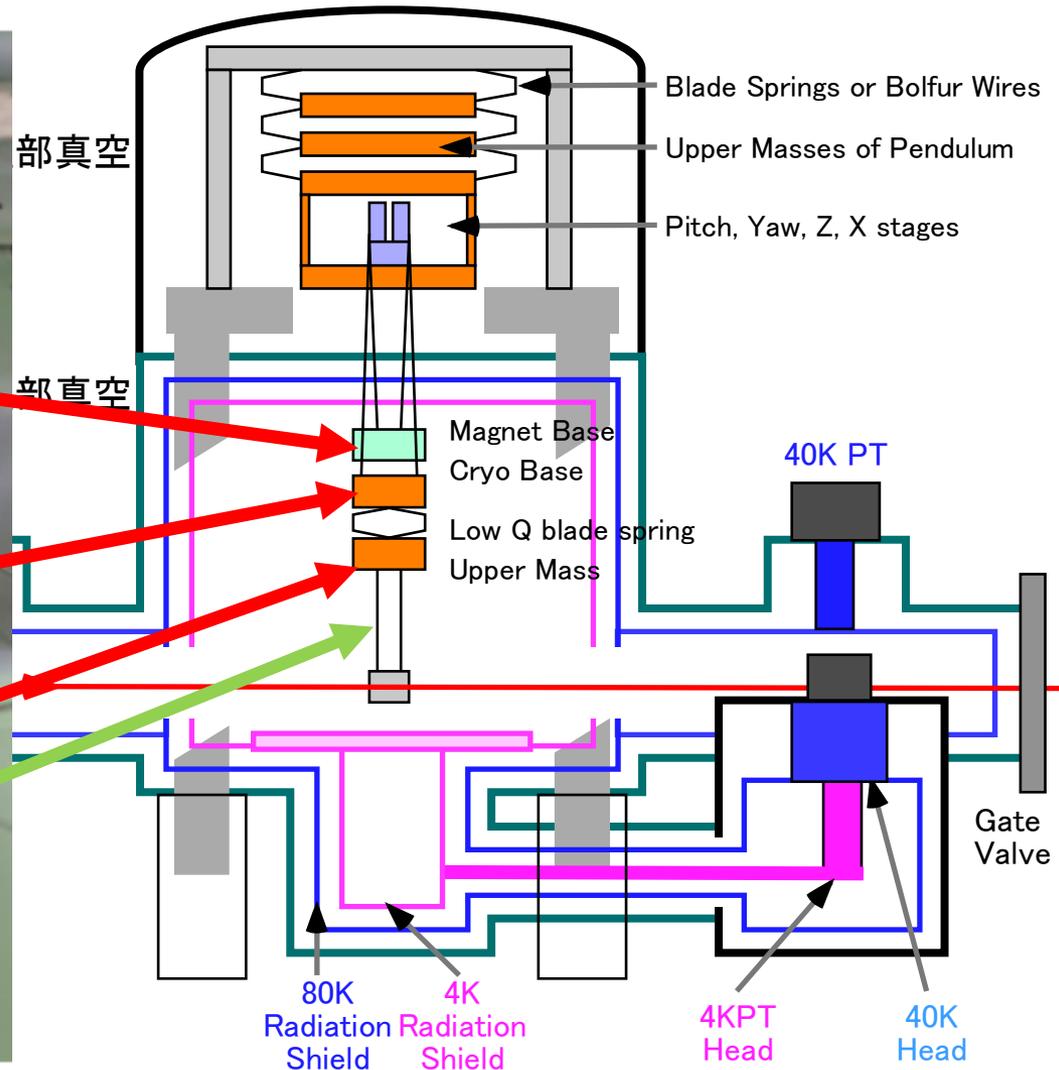
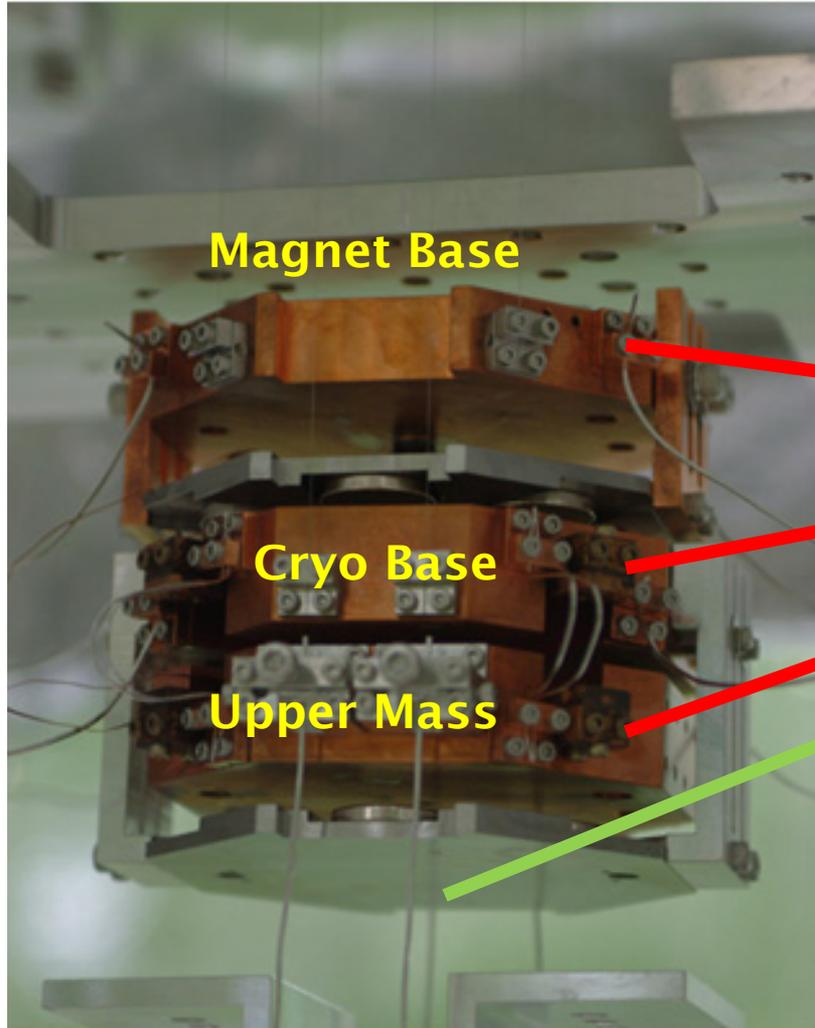
フロアを加味した熱雑音

⇒ 理論と実測が一致

D2我妻君  
物理学会発表

# 感度向上の最後の壁：熱雑音2

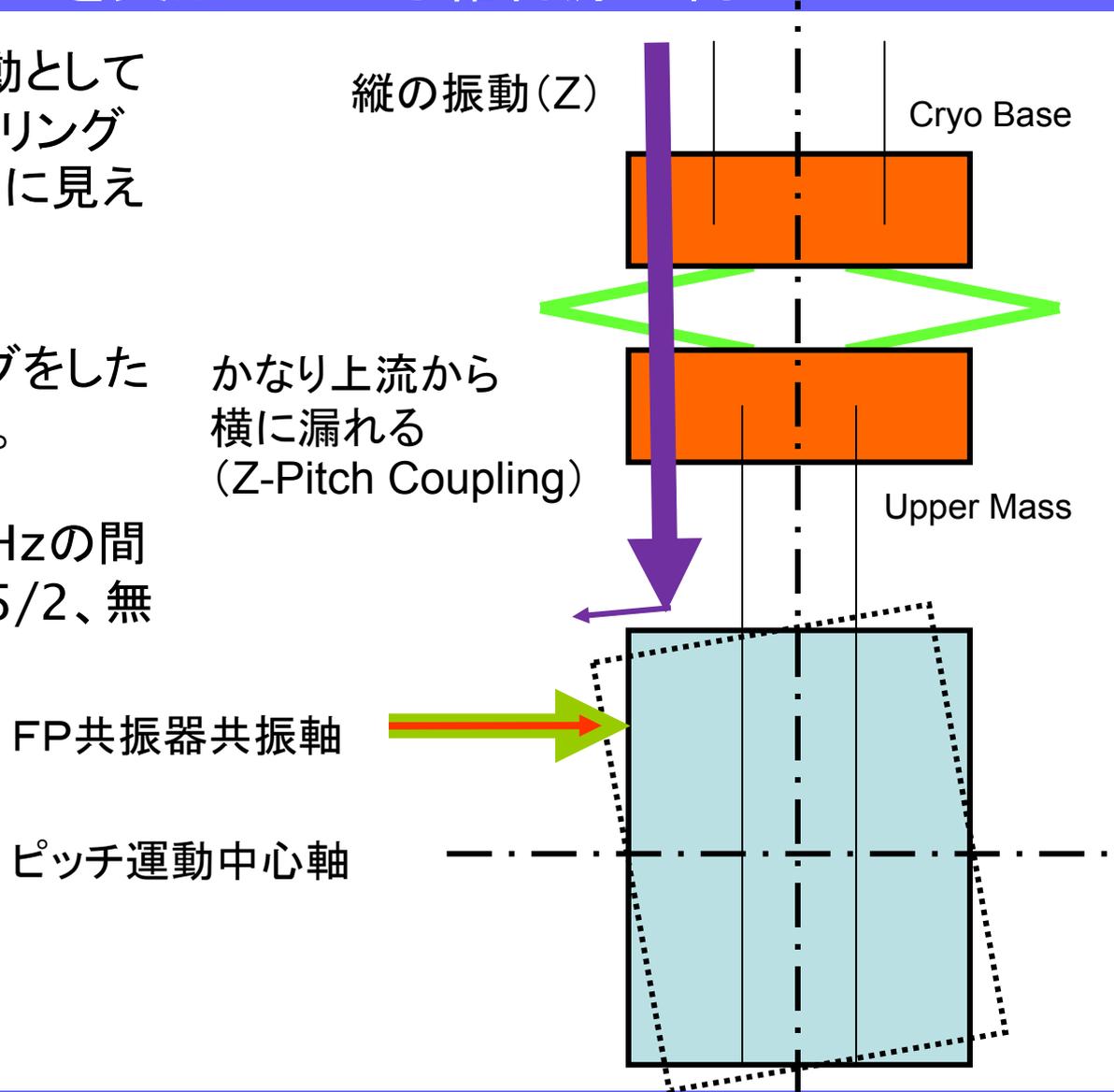
- 200Hz~20Hzを支配している雑音源は何？ -



# 感度向上の最後の壁：熱雑音2

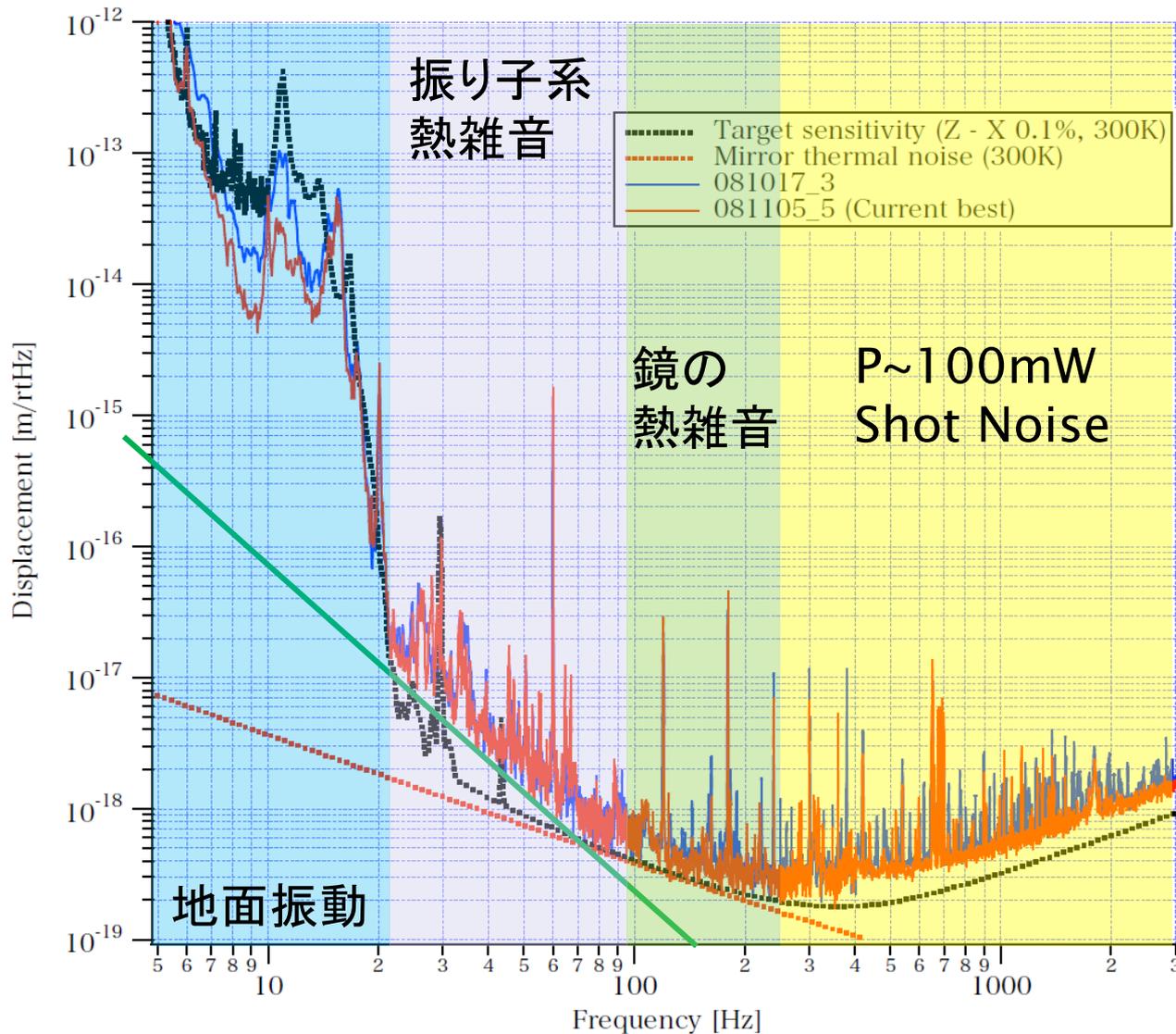
-300Hz~20Hzを支配している雑音源は何？ -

- 縦の地面振動は、ピッチ振動として漏れてくる。ビームセンターリング不十分だと、Xが動いたように見える。
- そこで、ビームセンターリングをしたら、汚い構造は低減された。
- しかし、今度は、20Hz~70Hzの間に、落としきれない？傾き-5/2、無構造な雑音が残った。



# 感度向上の最後の壁：熱雑音2

-70Hz~20Hzを支配している雑音源は何？ -



●残ったのは、ワイヤーのピッチの振動の熱雑音が横方向に漏れたものがまだ見えているかもしれない。

(緑線)

(ピッチのQは計測済み)

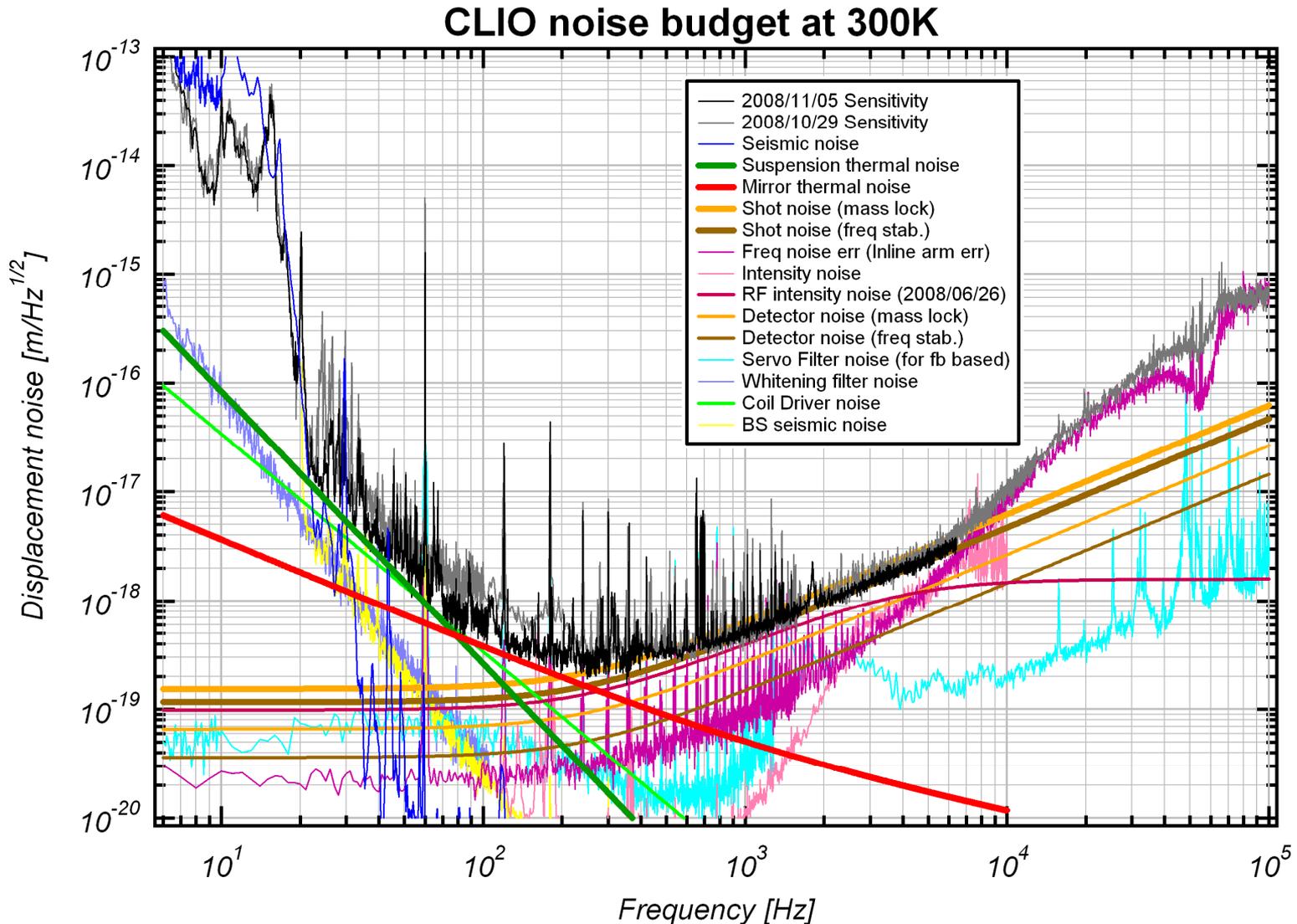
●振り子のQの推定値(これもワイヤーバイオリンモードのQを測定しそこから計算)から計算される振り子自身の熱雑音のレベルともほぼ一致する。

●250Hz~70Hzは鏡の常温熱雑音に接近(赤線)。

どれにしろ、熱雑音。

# 変位感度の雑音要素

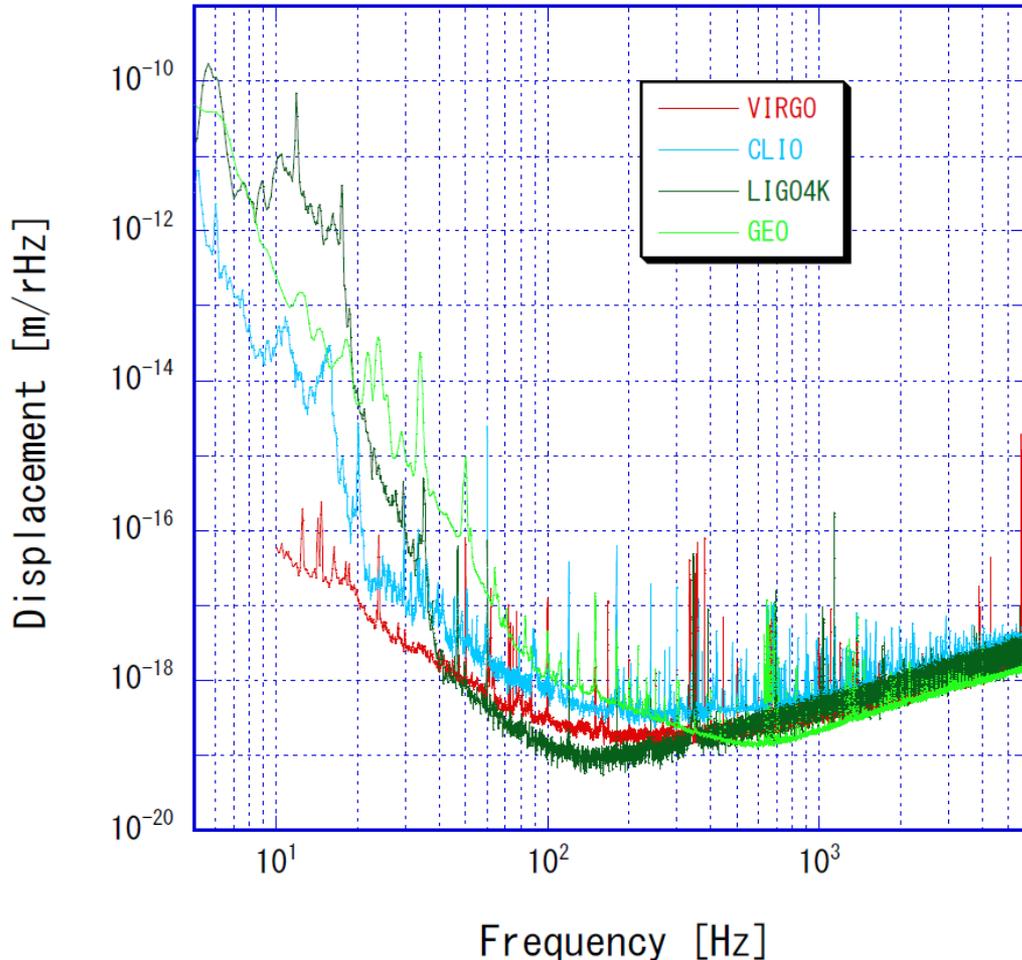
- TAMA技術を用いたテクニカルノイズの寄与推定 ~ 既知の技術的な雑音は感度以下-



# 世界の重力波観測装置との比較

-CLIO VIRGO GEO LIGO-

## VIRGO/CLIO/LIGO/GEO Displacements

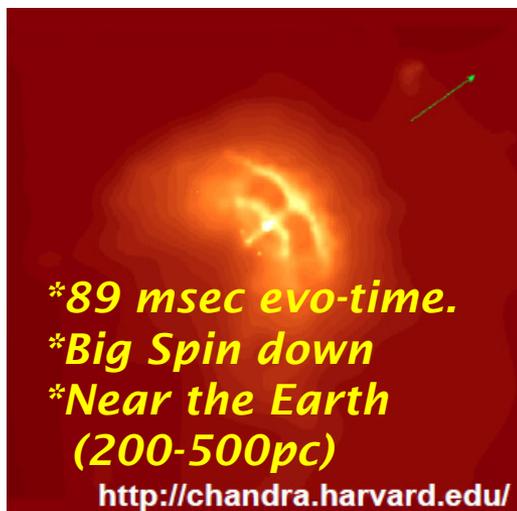


- 世界のkmスケールの干渉計と比較しても、変位感度は互角
- Virgoは、Super Attenuatorのおかげで、低周波で断トツ。
- LIGOはスペクトルのきれいさと、3台がほぼ同じ感度という点で優れる。
- GEOは先進的Detection技術でShot雑音を低減。
- 当然Strainではkmクラスが圧倒的に有利。
- 世界はすでにAdvancedな重力波望遠鏡開発(感度10倍)を開始。

# PSR J0835-4510 (Vela Pulsar)からの重力波

- T.Akutsu et. al., Class. Quantum Grav. 25 (2008) 184013. -

- In Feb.2006, we have done one week data taking for targeting GWs from Vela pulsar (PSR J0835-4510) because the CLIO “strain” sensitivity around 22Hz was comparable with VIRGO and LIGO 4K at that time.
- Vela has the largest spin-down upper limit  $\sim 5 \times 10^{-24}$  among the known pulsars.
- We analyzed the data using the Matched Filtering Method. Parameters are listed below. To keep the S/N loss less than 2%, we used 102 parameters templates (6 for A, 17 for  $\psi$ ).
- We obtained  $\sim 5.3 \times 10^{-20}$  assuming 10% calibration error. (99.4% conf)



$\alpha$ : 08h 35m 20.61149s	Right ascension of the source
$\delta$ : -45d 10m 34.8751s	Declination of the source
$\lambda$ : 36.25° N	Polarization angle
$\phi_r$ : 9h 26m 40.4s (MJD : 54144)	Deterministic phase
$\Omega_r$ : $2\pi(0.9973 \times 24 \times 3600)$	Rotation angular velocity of the Earth
$\gamma$ : 135°	Measured counterwise from East to the bisector of interferometer arms
$\xi$ : 90°	Angle between interferometer arms

unknown parameters

$A = [0, \pi]$  : Inclination angle  
 $\psi = [-\pi/4, \pi/4]$  : Polarization angle

# CLIO干渉計用高出力光源の開発

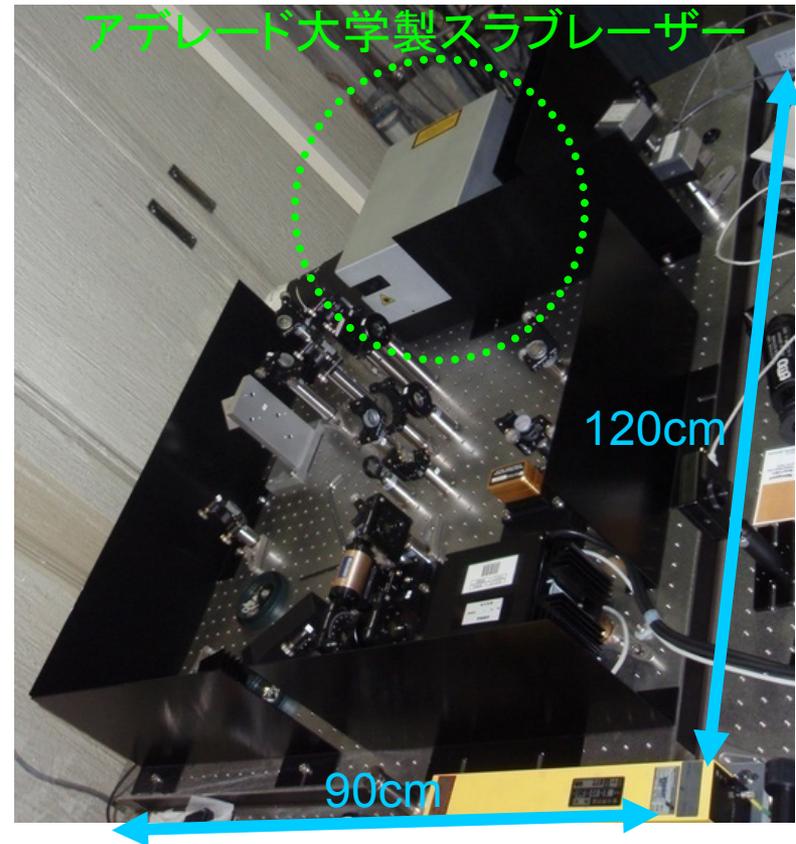
- 東大新領域・三尾研とアデレード大学・ムンク研共同 -

- CLIOの高周波側の感度の向上。
- 現在はInnoligt社製2Wレーザー。しかし、時に非常に不安定で、結局1.6Wくらいで使用。（2008年12月現在、レーザーの調子が過去最悪の状況で、実験にはなはだ支障が出ている。）
- もともとTAMA予備レーザー的な存在として、アデレード大学のムンク研開発の10W スラブレザーの提供をうけていたが、それを性能が満たされればCLIOに投入。調整は東大新領域・三尾研究室が行う。

# CLIO干渉計用高出力光源の開発

- 東大新領域・三尾研とアデレード大学・ムンク研共同 -

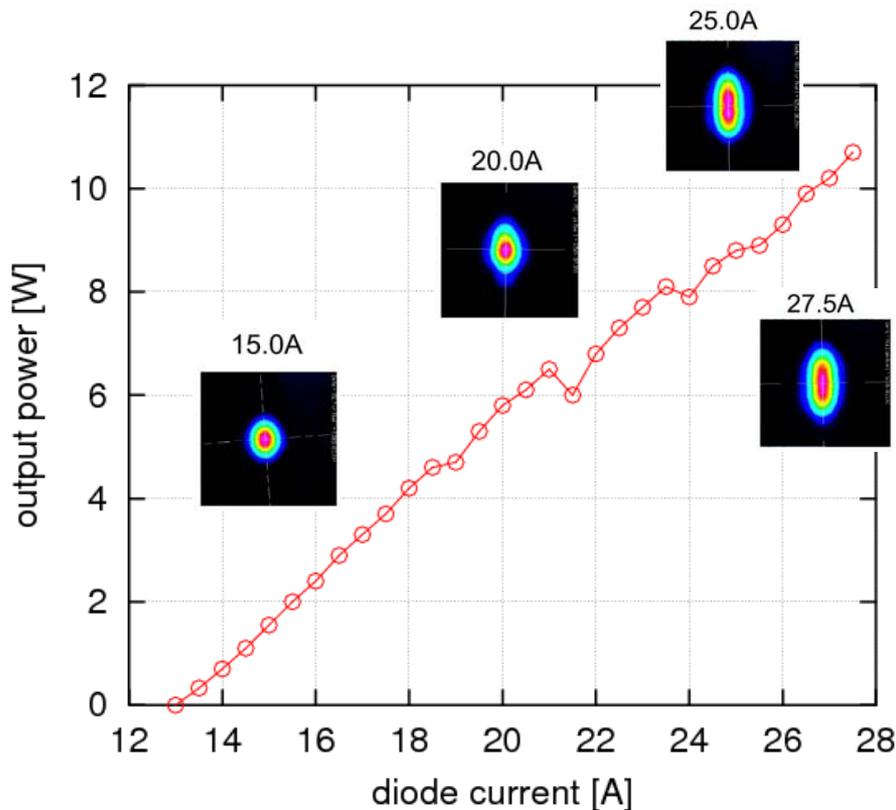
- アデレード大学製スラブレレーザー調整.
- これまで
  - ICRRにクリーンブース等の実験環境を構築.
  - 2008年3月, TAMAサイト(国立天文台)からICRRへ移動.
  - スラブレレーザーの動作確認&出力特性の測定.
- 現在
  - 注入同期用の光学系の設計.
- これから
  - 注入同期による狭線幅単一周波数発振の実現.
  - 品質(周波数・強度雑音)の評価および安定化.
- 90 × 120cm<sup>2</sup>のボード上に構成.
  - CLIOサイトへの移動を考慮.



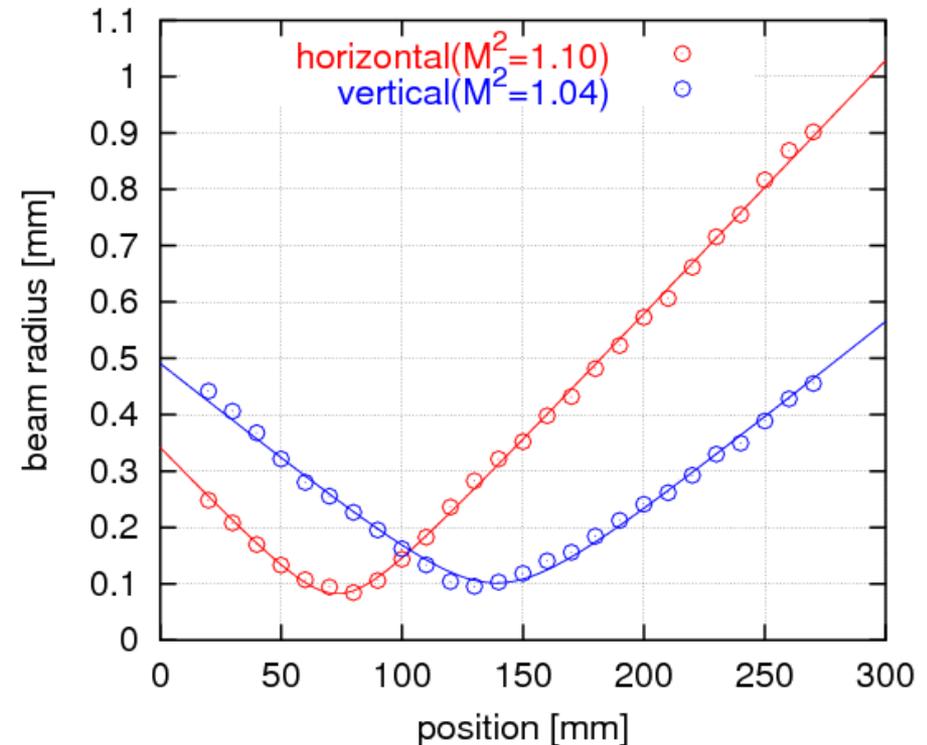
# CLIO干渉計用高出力光源の開発

- 東大新領域・三尾研とアデレード大学・ムンク研共同 -

- リング共振器構成での両方向発振時の出力パワー特性.
  - TAMA300入荷時のパワーを再現.



- $M^2$ の評価
  - $M^2=1.04$ (vertical),  $1.10$ (horizontal)
  - (※一度レンズを通した後の結果)



# New CLIO Collaboration

## ●2008年12月:国立天文台プロジェクトウィークでの発表

### ・日本の重力波プロジェクトの現状

- LCGT 実現に向けて技術的、政策的に極めてクリティカルなフェーズにある
- 技術的には部分的によい成果を得つつ、全体的には、予算とマンパワーの制約により、世界情勢に遅れた

### ・当面の進め方

- できるだけ早期に新しい体制を確立(すでに新CLIO推進体制で進行中)
- TAMA は当面中断し、リソースをCLIO へ集中する方針
- これにより我が国の特徴である冷却による優位性を早期に確立
- この方向で、プロジェクトのビジョンと、具体的なシナリオの検討  
⇒ 3ヶ月後を目途に取りまとめ

# Summary

- CLIOの感度は、70Hzから250Hzの間で、常温で鏡の熱雑音にほぼ到達した。20Hzから70Hzも振り子ピッチか振り子の熱雑音と思われる。常温での目標感度をほぼ達成。
- 振り子の熱雑音を、高いQのレベルでみることができた。
- 10Wアデレードレーザーを、元のパワー、ビーム品質に近い状態まで復旧するところまでできた。
- Vela Pulsarからの連続波重力波に対する実験的 Upper Limit を与えた。但し、理論値よりは大きい。
- TAMAメンバーを加えた、新しいCLIO推進体制ができた。すでにその前段階で、CLIO感度・雑音寄与検証に大きく貢献。
- 2009年1月から、CLIO低温化の準備を始め、4月頃から冷却実験を開始する予定。