

懸架点干渉計のLCGTへの適用

麻生洋一, 安東 正樹

東京大学 理学系研究科 物理学教室

LCGT Design Meeting
東京大学 本郷キャンパス, 2002年06月21日

内容

- 懸架点干渉計
 - 概要、利点、限界
 - プロトタイプ実験
 - 概要、結果
 - LCGTに向けて
 - ヒートリンクの振動
 - 観測装置として
-

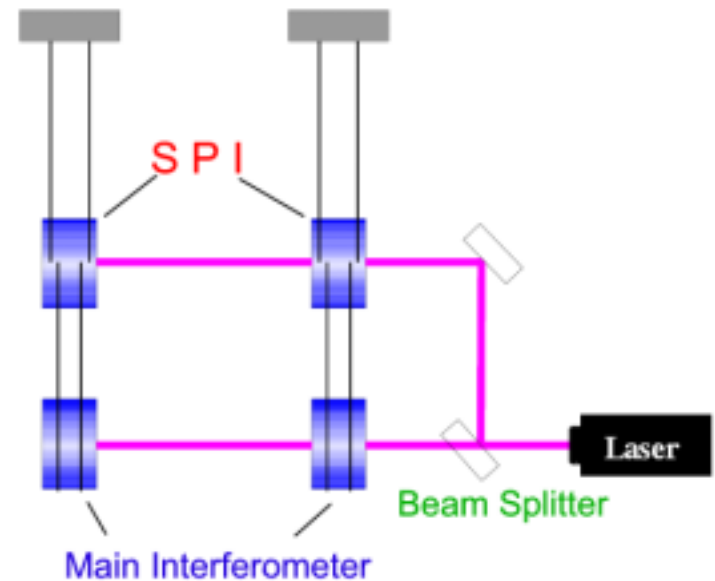
懸架点干渉計 (1)

- 懸架点干渉計とは -

- 懸架点干渉計 (Suspension Point Interferometer, SPI)
 - 干渉計の上段に補助干渉計を構成
 - 主干渉計と同等の感度を持つ
 - 長さ・角度変動を制御により能動防振
 - ➡ 主干渉計を安定化
 - 補助干渉計からの防振の効果



究極の性能を持った
干渉計型重力波検出器



懸架点干渉計 (2)

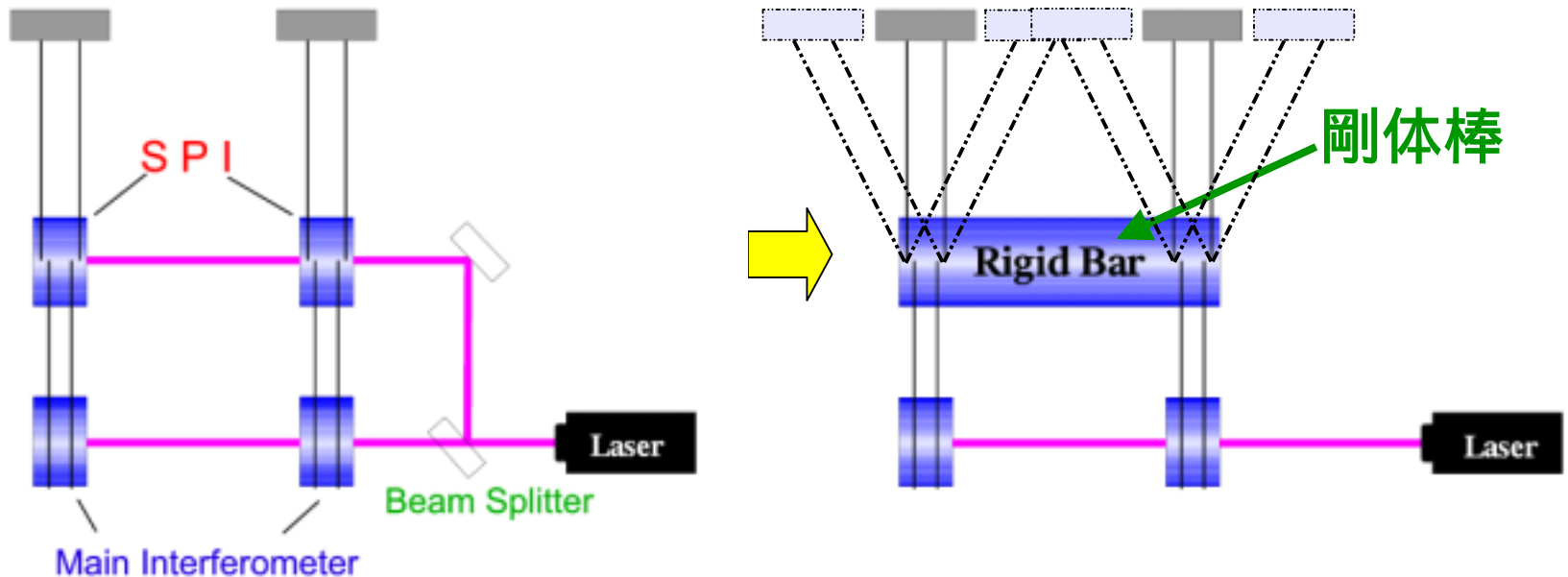
- 原理 -

● 懸架点干渉計を制御

➡ 一つの剛体棒とみなすことができる


(制御ゲインが無限大、レーザーに雑音が無いと仮定)

➡ 主干渉計の共振器長変動は無くなる



懸架点干渉計 (3)

- 特徴 -

- 究極の能動防振
 - 主干渉計と同等の性能を持つ
補助干渉計で変動を検出
 - 主干渉計と同じ自由度を計測
- 
- 全周波数帯での防振
 - センサーの雑音の影響は無い
 - 制御による悪影響も無い
 - ローカルレファレンスの変動
 - 制御による信号の損失
 - アクチュエータの雑音
-

懸架点干渉計 (4)

- 利点 -

● 将来のレーザー干渉計重力波検出器で期待される効果

● 強力な能動防振効果

● 観測帯域での防振比向上

- 観測帯域の低周波化

● RMS変動の減少

- 干渉計動作の安定化
- アクチュエータ雑音の低減
- ロックアクイジションの易化
- 制御系の単純化

● 熱リンクからの振動を抑制

● 複数の干渉計による観測

- 重力波以外の効果を除去

- 他の部分の設計次第でも実現できる可能性

- SPIの導入は大掛かりになる可能性

- 究極の性能はSPIで実現される

- 各要素をそれぞれ工夫するのと比べてどちらが簡単か

懸架点干渉計 (5)

- 性能の限界 -

● 懸架点干渉計の性能を制限する要因

● 懸架装置の非対称性

● 剛体棒の同相変動

鏡の差動変動

$$\text{CMRR} = 2 \left| \frac{H_1(\omega) - H_2(\omega)}{H_1(\omega) + H_2(\omega)} \right|$$

主に振子長の誤差で制限

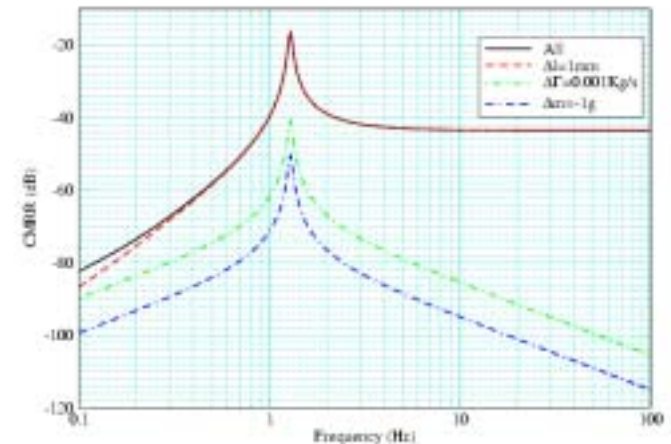
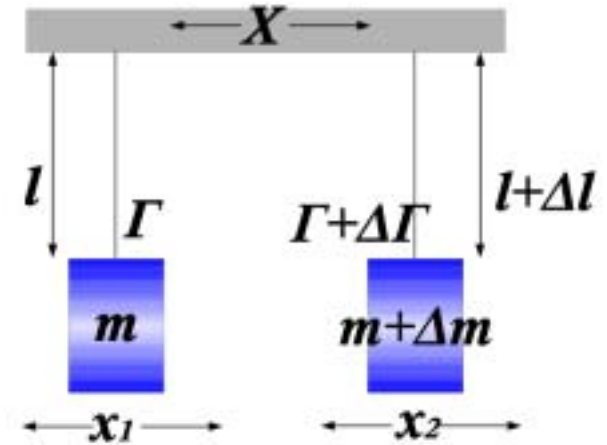
$$\text{CMRR} \simeq \Delta l / l$$

● 懸架装置の縦横カップリング

● 懸架点の縦変動

鏡の差動変動

● 制御ゲインの不足



懸架点干渉計 (6)

- 考慮すべき点 -

- 初期アライメント

- 2つの干渉計を同時にアライメントする
 - 懸架時の精度(並行度)
 - 懸架後のアクチュエータのレンジ



- 上下段を独立に調整できる工夫が必要

- 導入の手間、コスト

- フルスケールの干渉計が余分に必要
- 他の方法とどちらが手間が大きいのか？

- 低周波防振・低温技術と併用

➡ 同等の感度を短基線で
実現できる可能性

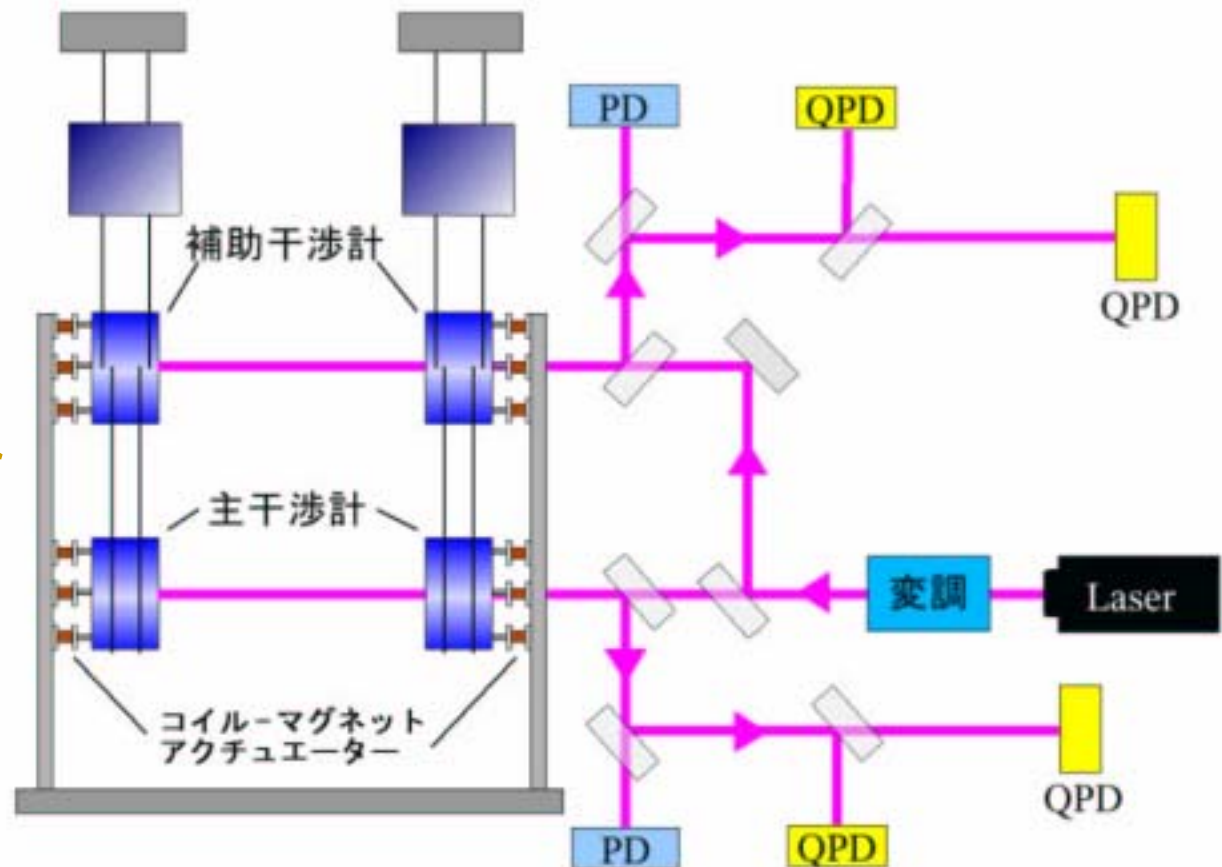


むしろコスト削減？

プロトタイプ実験 (1)

- 概要 -

- 共振器 (上下2段)
 - 長さ 150mm
 - フィネス 208
- 制御
 - PDH法, WFS法
 - 15MHzの変調
 - コイル-マグネットアクチュエータ
- 懸架装置
 - 3段振り子
 - 最上段に受動ダンピング



プロトタイプ実験 (2)

- 懸架装置 -

● 3段振り子

● 懸架点

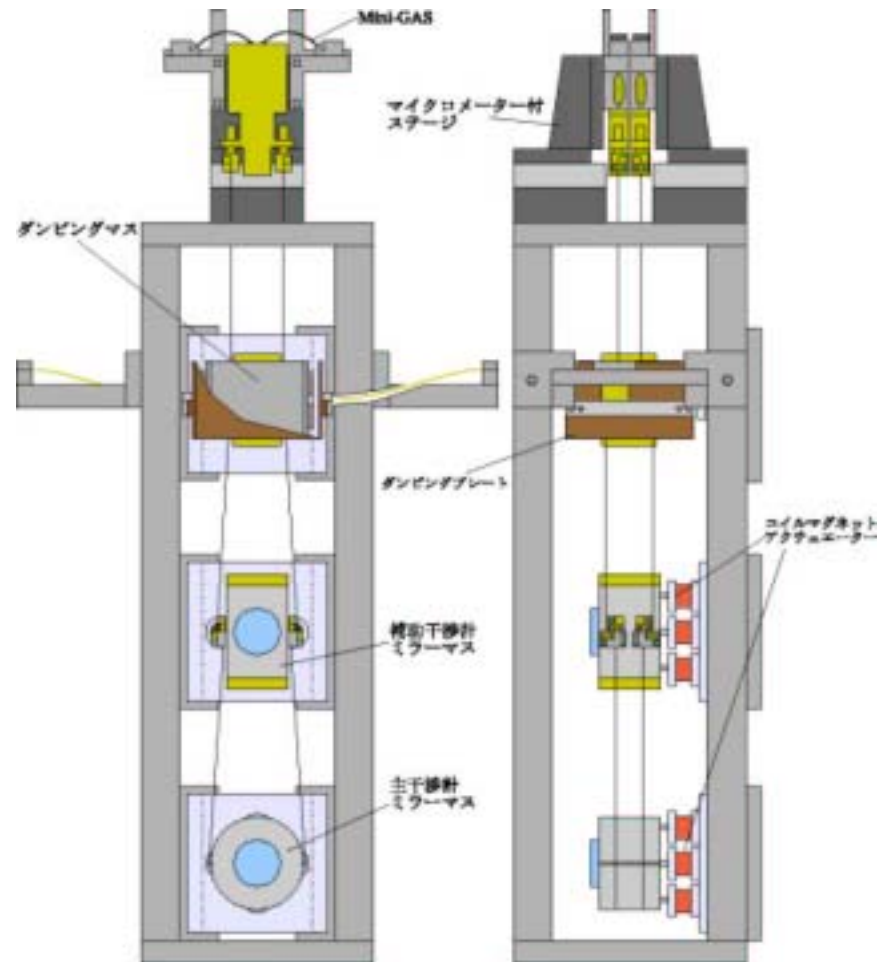
- アライメント用マイクロメータ
- Mini-MGAS (縦防振)

● 最上段

- マグネティックダンピング
- 加振用アクチュエータ

● 最下段・中段

- 鏡を接着
- コイル-マグネットアクチュエータ



プロトタイプ実験 (3)

- 光路長制御実験 -

● 主干涉計の光路長変動スペクトル

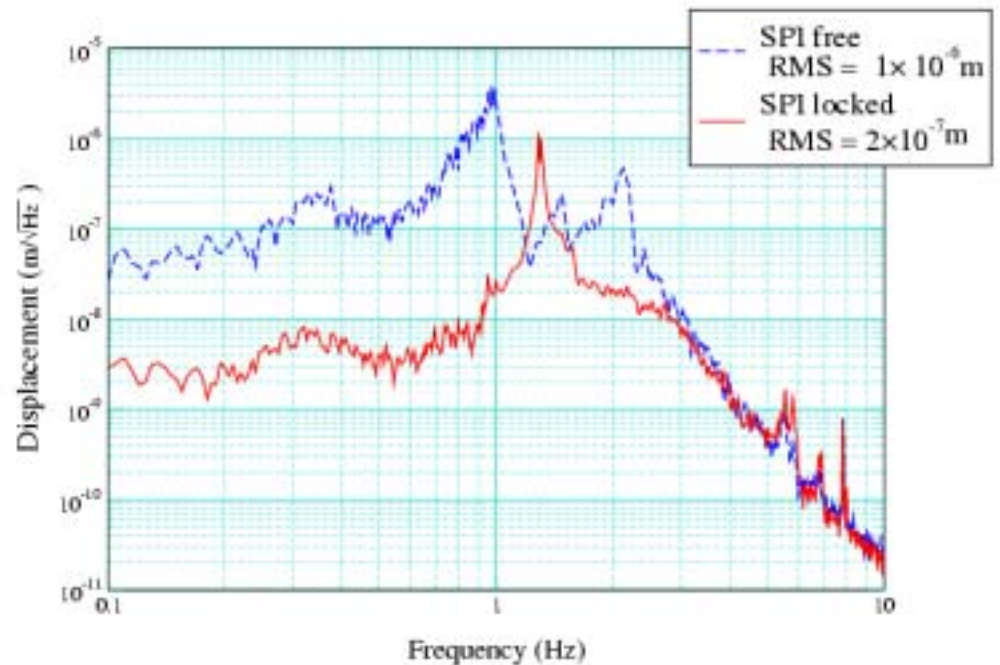
補助干涉計の**制御**/非制御時

- 3段振り子の共振が消え、
単振り子の共振が見える
- 低周波数帯で
1-2桁の抑圧比
- 3Hz以上で差が無い



縦振動の影響で制限

- RMS変動は約1/5



プロトタイプ実験 (4)

- 光路長制御実験 -

● 加振実験

- 最上段をコイルマグネットで加振し、伝達関数を測定
(補助干渉計の**制御**/非制御時、それぞれで測定)

● 低周波数

- CMRRの計算結果と
同様な傾向

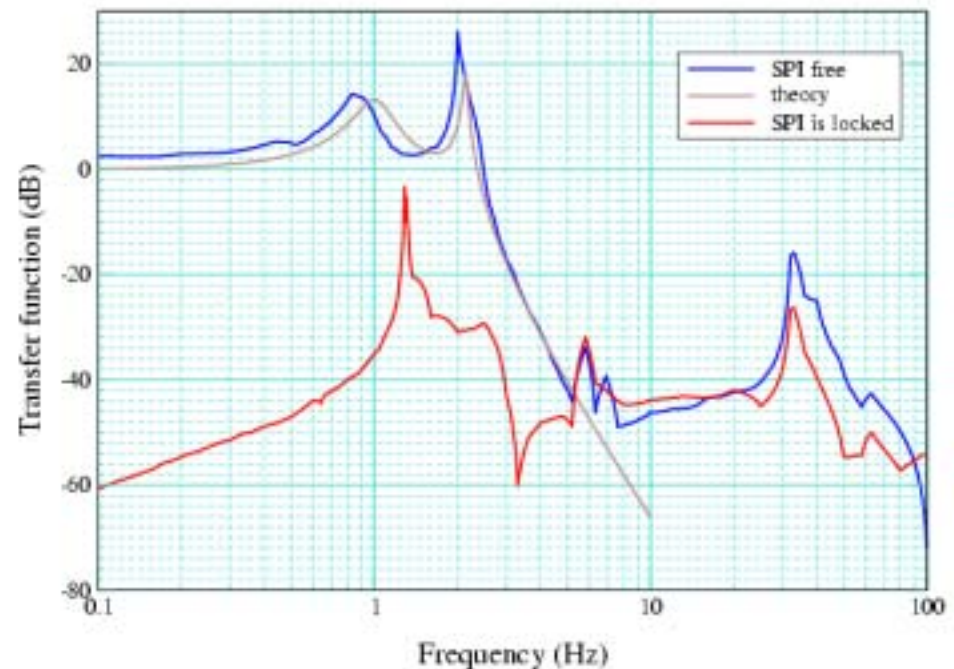
- 40dB以上の抑圧比

● 共振付近

- 単振子の共振ピーク

● 5Hz以上

- 励起の非対称の影響で
測定できていない



プロトタイプ実験 (5)

- アライメント制御実験 -

- 主干涉計のアライメント変動スペクトル
補助干涉計の**制御/非制御時**

- 低周波数帯で
約3の抑圧比



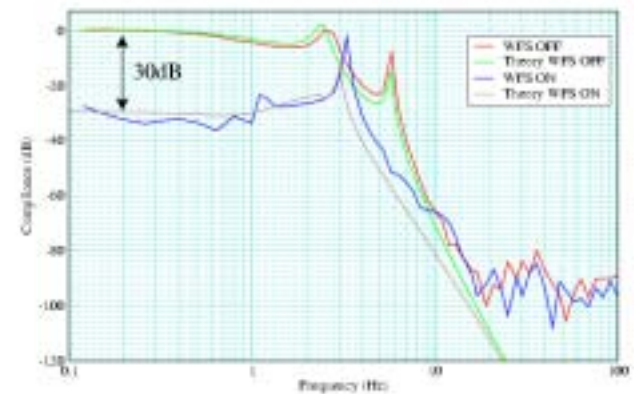
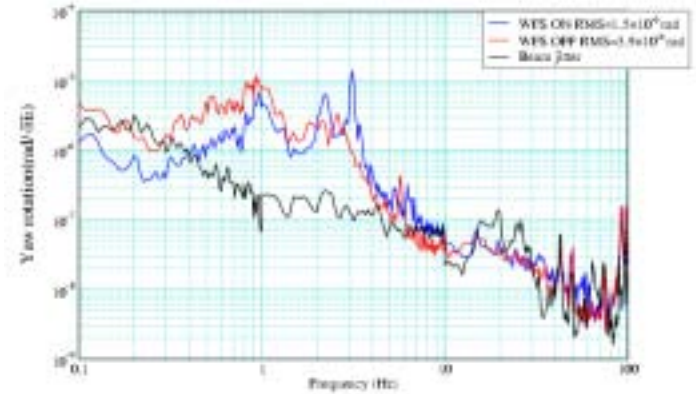
ビームジッターの影響で制限

- アライメント伝達関数

- 低周波数帯で約30の抑圧比



制御ゲインからの見積もりと一致

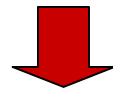


プロトタイプ実験 (6)

- プロトタイプ実験結果のまとめ -

- 抑圧比と、制限している要因

	光軸方向制御	アラインメント制御
スペクトル	1-2桁の抑圧比 (縦振動で制限)	約3の抑圧比 (ビームジッターで制限)
加振実験	40dB以上の抑圧比 (懸架の非対称で制限)	30dBの抑圧比 (制御ゲインからの 見積もりと一致)



本格的な実験によって、向上する可能性は大きい

LCGTに向けて (1)

- ヒートリンクからの振動 -

- ヒートリンク

鏡に近い方が良い (冷却効率からの要請)



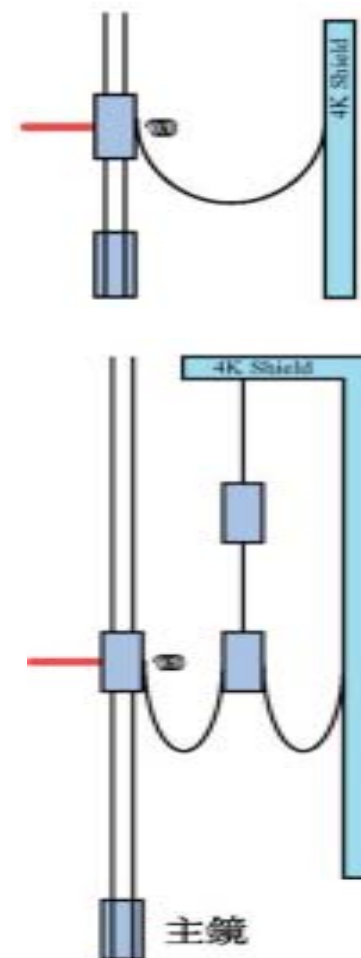
鏡からは遠い方が良い (防振からの要請)



懸架点干渉計で解決できるか？

- 簡単な見積もりを行う

- 4kシールド：神岡の地面振動レベル
- ヒートリンク：共振周波数 0.2Hz
20Hzまで $1/f^2$
- 懸架点干渉計：40dBの抑圧比



LCGTに向けて (2)

- ヒートリンクからの振動レベル -

● 振動レベル

● ヒートリンク 1本

1×10^{-18} m/Hz^{1/2} (10Hz)

1×10^{-22} m/Hz^{1/2} (100Hz)

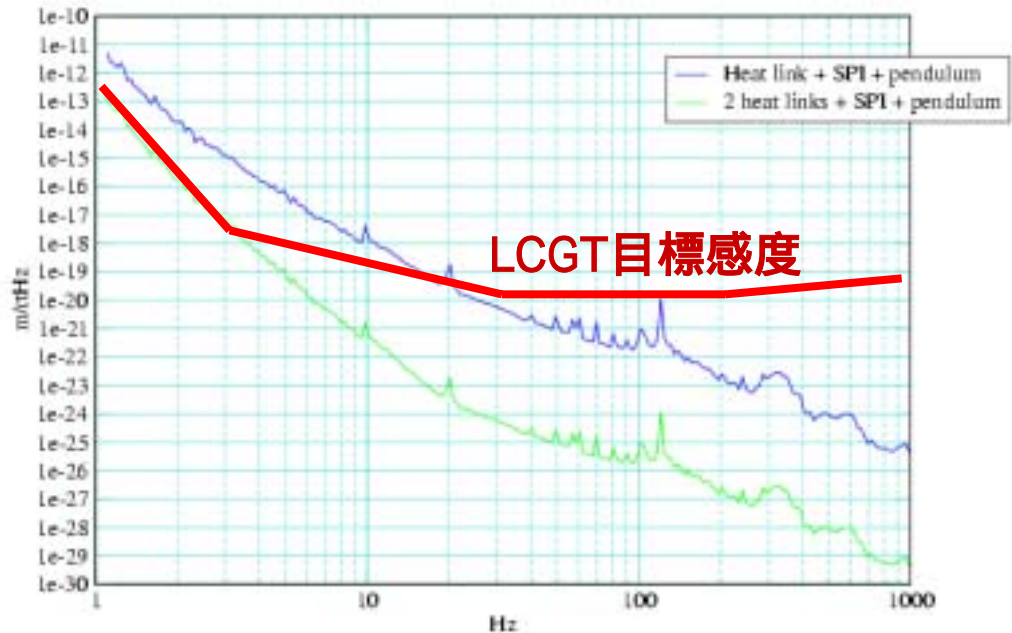
● ヒートリンク 2本

1×10^{-21} m/Hz^{1/2} (10Hz)

1×10^{-26} m/Hz^{1/2} (100Hz)



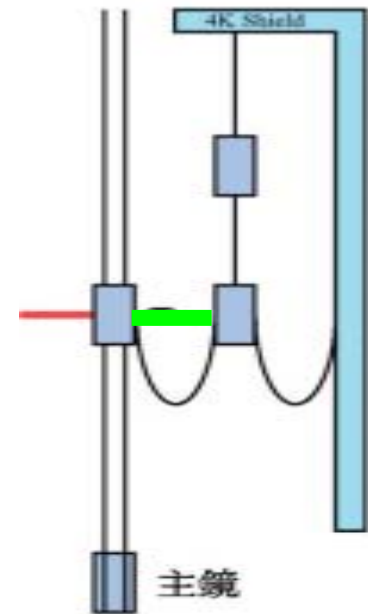
LCGT目標感度レベルを
なんとか満たすレベル



LCGTに向けて (3)

- ローカルコントロール -

- 単にヒートリンクからの振動のみを考慮
 - ➡ ローカルな懸架点干渉計でも可能 (森脇案)
- ローカルレファレンスの防振が必要など、懸架点干渉計の多くのメリットは享受できない



LCGTに向けて (4)

- コインシデンス観測 -

- 懸架点干渉計での同時観測

- 重力波信号

➡ 2つの干渉計に対して同様に現れる (振幅、位相、タイミング)

- ほとんどの外来雑音

➡ 2つの干渉計での相関は小さい

(地面振動、レーザーの雑音、熱雑音、散射雑音など)



非常に効果的に非定常雑音を除去

- 独立な2つの干渉計の場合

- 同じサイト 地面振動に相関

- 別サイト 相関時間幅を広くする必要 除去効率の低下

建設コストが倍必要

LCGTに向けて (5)

- 帯域の役割分担 -

- 懸架点干渉計と主干渉計で観測帯域を分ける
 - 懸架点干渉計 : 高周波数向け干渉計
低周波数は、地面振動やヒートリンク、輻射圧雑音で制限
ハイパワーを用いて散射雑音を下げる
 - 主干渉計 : 低周波数向け干渉計
低周波数は懸架点干渉計からの防振効果を期待
レーザーパワーを下げて輻射圧雑音を下げる
-

まとめ

- 懸架点干渉計
 - 究極の能動防振装置
 - どんな干渉計があっても2桁以上性能が向上
 - 同じ場所にある独立な2つの干渉計
 - 非定常成分を大幅に除去できる
 - プロトタイプ実験
 - 光軸方向40dB、角度方向30dB程度の振動抑圧
 - ヒートリンクの振動
 - 抑圧することは可能そう
 - 詳細なデザインと見積もりが必要
-

議論

- 懸架点干渉計は必要か？

- 他の方法でも解決できる可能性
- ローカルな懸架点干渉計という選択肢



- 複合的にさまざまな利点がある
- 究極的な性能の実現には必須
- 2台作るよりは効率的で観測上の利点も大きい



戦略上の決断

LCGTの新たな特徴となる可能性
