

SPI & heat link design

2008/07/29

Takashi Uchiyama

検討項目

- ヒートリンク防振 内山
 - 08/07/08に報告済み。
- SPI cost(真空系に与える影響) 高橋様
- Actuator・制御関連 辰巳様
- SPIによる重力波検出 神田様
- SPI実装のための課題 麻生さん
- SPI実験状況 安東様

SPI cost

内山： SPIがない場合のコストダウンの効果を知りたいと考えています。
SPIのあるなしで真空関係の設計が変わり、コストは変化するのでしょうか？

高橋： SPIがなくなっても6kmのメインダクトは1mでいくと思います。
センター部分の接続が0.6mでよくなるとこの部分に使うGV 5台分の
費用が浮きます。真空ポンプはMC2の腕用が1セット不要となるか
もしれません。MC2は180m級のものはありませんでしたが、まだ最終的な
長さが未定です。10m級ならそもそも不要となります。

各単価は以下のとおり。

DN1000 GV: 2125万

DN630 GV: 705万

Pump Unit: 777万

もしGV 5台をDN1000からDN630に変更し、ポンプユニットを1セット
減らした場合、**7,877万円**のコスト削減となります。

Actuator ・ 制御関連

SPIか冷凍機の防振か？ (アクチュエーター編)

- ・ Test mass actuator は 100 nm 程度しかレンジがない。
→ Upper mass actuator が必要。
- ・ 制御によって Upper mass actuator 雑音を抑圧しないと Upper mass actuator を強く出来ないので、制御レンジが足りない。
→ 制御は不可欠。(servo gain > 40 dB at 10Hz)
- ・ Radiation pressure で鏡が飛ばされるので
 - Lock 時には強い actuator を用いる。 lock 用 actuator
 - Upper mass servo で追従する。 難易度：大
 - Caltech 40m のように肩ロックさせて、徐々にパワーを増大させる。→ 要検討。
- ・ 共振が得られる領域は 0.34 nm for length, 10 urad for pitch and yaw

Actuator ・ 制御関連

内山：検討項目の一つとして、SPI無しの場合の制御について検討しています。
coil actuatorのノイズが問題であることは理解しているのですが、それを回避するためにSPIが「必須」なのかどうかを知りたいです。

もし、SPI以外の代案を持っていましたらお願いします。
SPIと比較した時のメリット、デメリットが分かるとありがたいです。

Sensing に関する辰巳の考えをまとめておきます。

(1) Test mass cavity が lock してしまえば、
通常の sensing 方法 (test mass を PDH で sensing) と
test mass actuator + upper mass actuator で振動を押し込めるはず。
(range の問題も含めて問題ないのではないか)
+ SAS で drift control も可能ですし。

(2) **問題は lock acquisition 可能か否か。**

(3) TAMA の経験上、lock acquisition が出来ないと話にならないので
システムには冗長性が必須と考える。

よって、きちんとした対案が出来ない限り SPI を捨てるべきではない。
他の方法も含めて、引き続き実現に向けて開発を進める。

SPIによる重力波検出

内山：SPIと主干涉計によるコインシデンス解析の可能性についてご意見をいただけないでしょうか？

SPIを重力波検出に用いた場合について

神田展行

平成20年7月26日

以下に、SPIを重力波検出に用いた場合に、どの程度の効果が得られるかの概算を示す。考慮すべき事項は、大別して2つ：重力波信号検出としての性能、偽信号棄却としての性能、である。計算にあたっては、LCGTデザインレポート (Version 2.0, April 4, 2007) の図4.14をもとにしたスペクトルの近似曲線 (下図1) をもちいた。

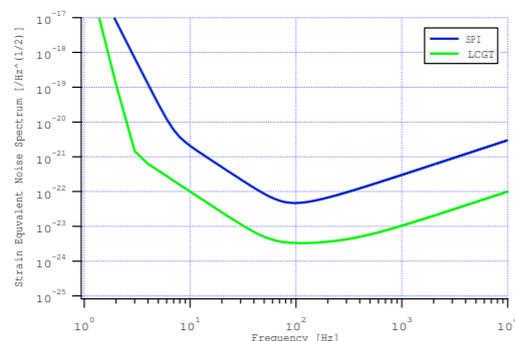


図1: LCGT主干涉計とSPIの雑音スペクトル

また前提条件として、

- 伝達函数補正後のそれぞれの干涉計の信号は、重力波に対する応答は同等で雑音レベルが違う
- 定常的な雑音については、2台の干涉計は独立である
- 非定常な雑音のうち外乱に起因するものは、2台の干涉計に電気信号で同程度のSNRであられる

と考えることにする。

• 連星合体

- LCGT主干涉計がSNR>10を得るであろう連星合体信号のうち、SPIがSNR>3を得られるものは $(50/240)^3 \approx 0.9\%$ にすぎない。

• パルサー

- LCGTで感度の届くもののうち1割以上はSPIでも観測できる感度。

• 背景重力波

	$h_0^2 \Omega_{GW}(100\text{Hz})$
LCGT 単独	$\sim 3.8 \times 10^{-5}$
LCGT 2台、1年積分	$\sim 4.8 \times 10^{-10}$
LCGT+SPI、1年積分	$\sim 6.7 \times 10^{-9}$

表1: 背景重力波にたいする感度

• 偽信号棄却

- 他の制御系や環境モニターなどの外部信号と同じく有用である。

SPI実装のための課題

内山：LCGTにSPIを実装するに当たって、何が問題になるか挙げていただけないでしょうか。
その際に、以前は必須だったヒートリンク防振のための40dBの防振性能は無視して、つまり、SPIにとって条件を緩くして再検討していただけないでしょうか？

- 主干渉計ミラーとSPIミラーとの独立アライメントが唯一の課題。
 - 防振性能の有無は関係なし。
 - SPIミラーのアライメントを調整する機構を考えるべき。
- 案1：SPIミラーを、中段マス上に、ピコモーター付きの光学マウントを使って固定する。
 - 低温用のピコモーターはある。
- 案2：中段マスからSPIミラーを、pitch, yawに柔らかく、並進方向には堅くなるようにつり下げる。アライメントはコイルマグネットアクチュエーターで行う。
 - ワンループ、短い振り子長が必要。

SPI実験状況

内山：本郷でのSPIの現在の研究実態に興味があります。

安東：SPI実験のセットアップは、麻生君卒業後、ほとんど手付か
ずの状態です。なので、それ以後の進展はありません。

復帰させることは、懸架装置、回路などもほぼそのままなので
可能だと思います。入射光学系の定盤が動いているので、
そのアライメント調整など、各種調整は必要だと思います。

道具立ては揃っていますので、復帰させるとすると、麻生君が
いれば1ヶ月、ちゃんとした学生がいれば2-3ヶ月といったところ
かと思います。

Appendix 1

SPI & heat link

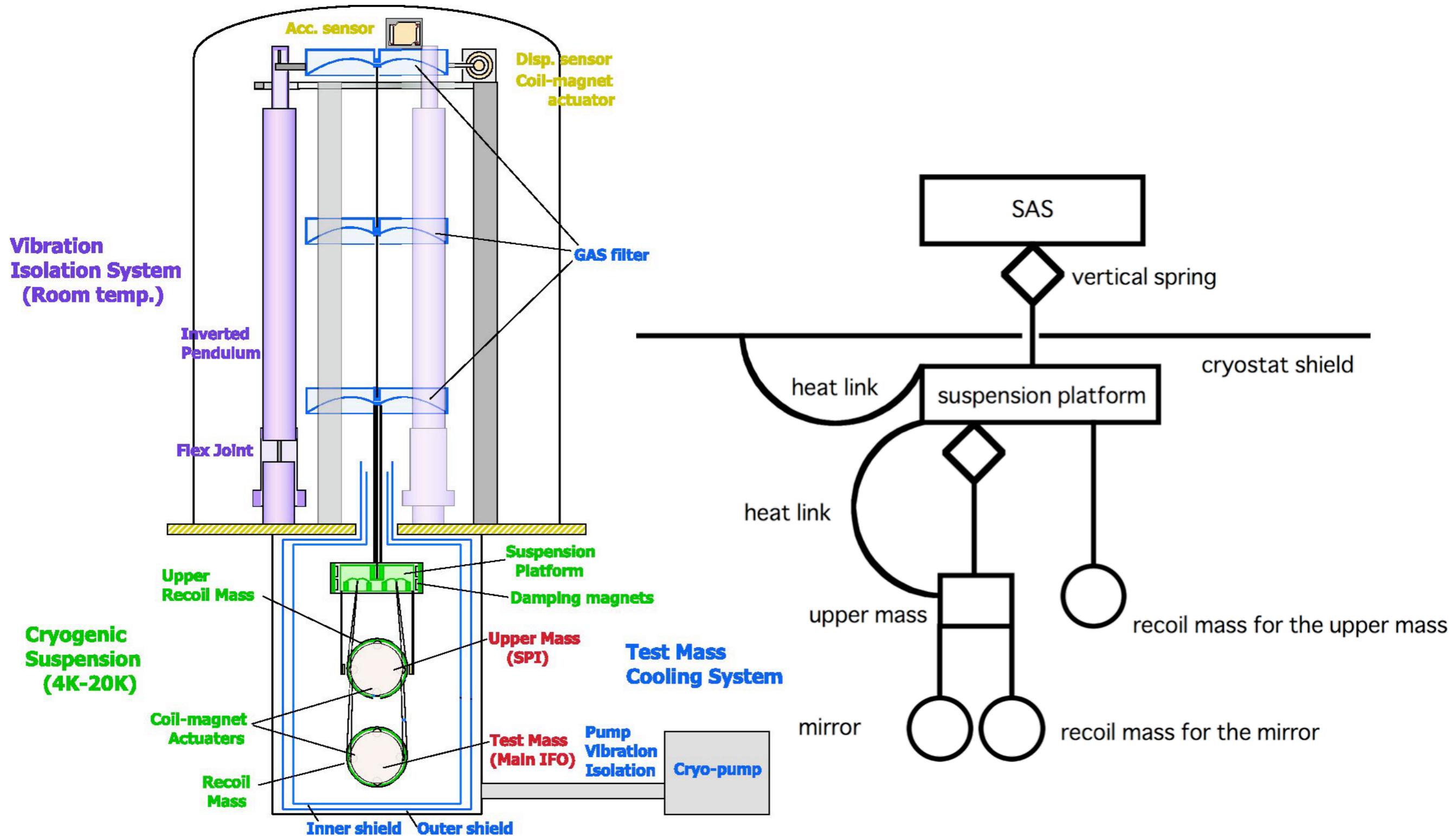
design

2008/07/08

Takashi Uchiyama

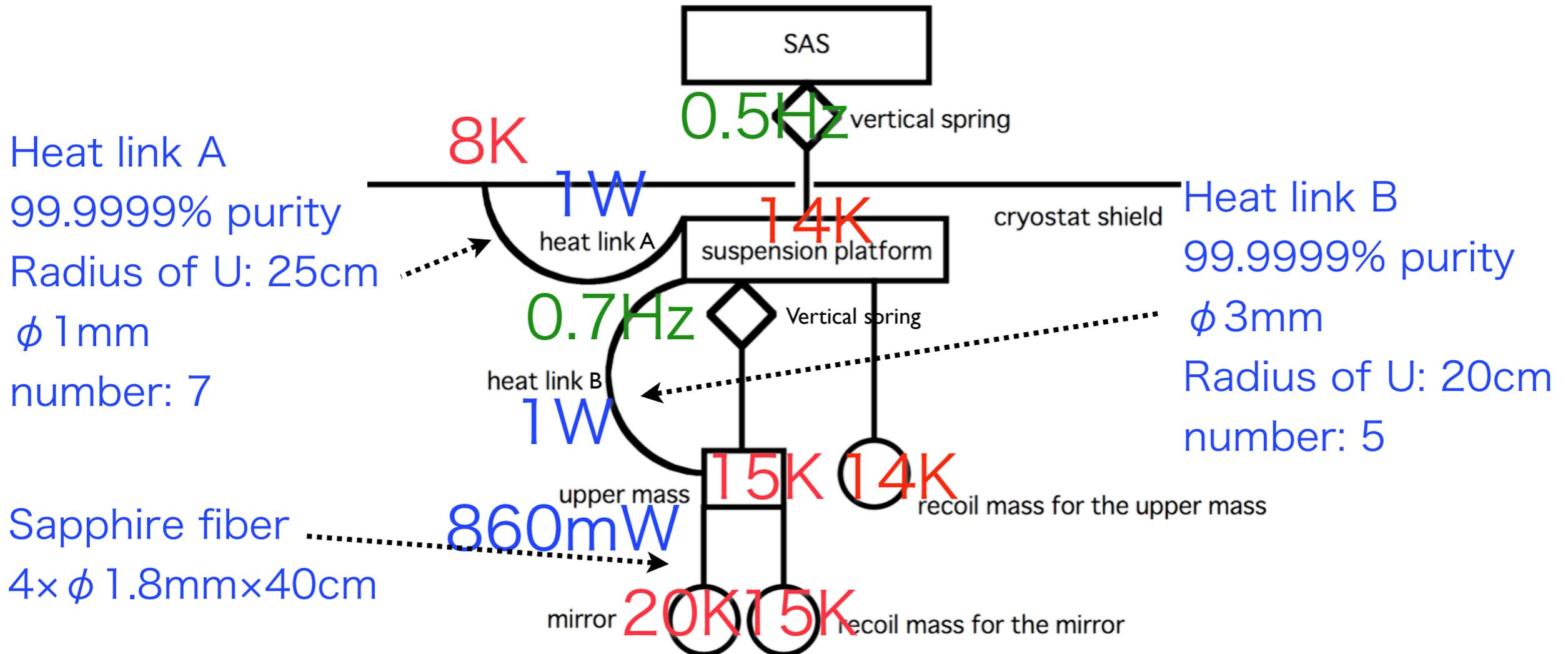
- 三代木さん担当のテーマですが内山が代理で話します。
- そこで、事前に三代木さんに問い合わせました。
- 7/8のlcgt会議についてです。川村さんから「SPIについて」当日分の代理を要請されました。三代木さんの方でSPIについて結論とストーリーを持っているようなら教えてください。あれば、その話を当日、皆さんに紹介します。
- 返答は
- 私も技術的にかなり無理だとおもいます。太いサファイアファイバーの懸架ですらまだ研究項目なのにそれが大前提ではじまる話ですし、百倍のぼうしん効果のためにやるのも多大な工夫が必要すぎだとおもいます。なんとか普通のぼうしん装置でヒートリンクからね振動を押さえるストーリーは出来ないでしょうか？
- SPIに対してはNegative.
- しかし、代わりになるストーリーはまだ無い...

Suspension model



現在のヒートリンク設計

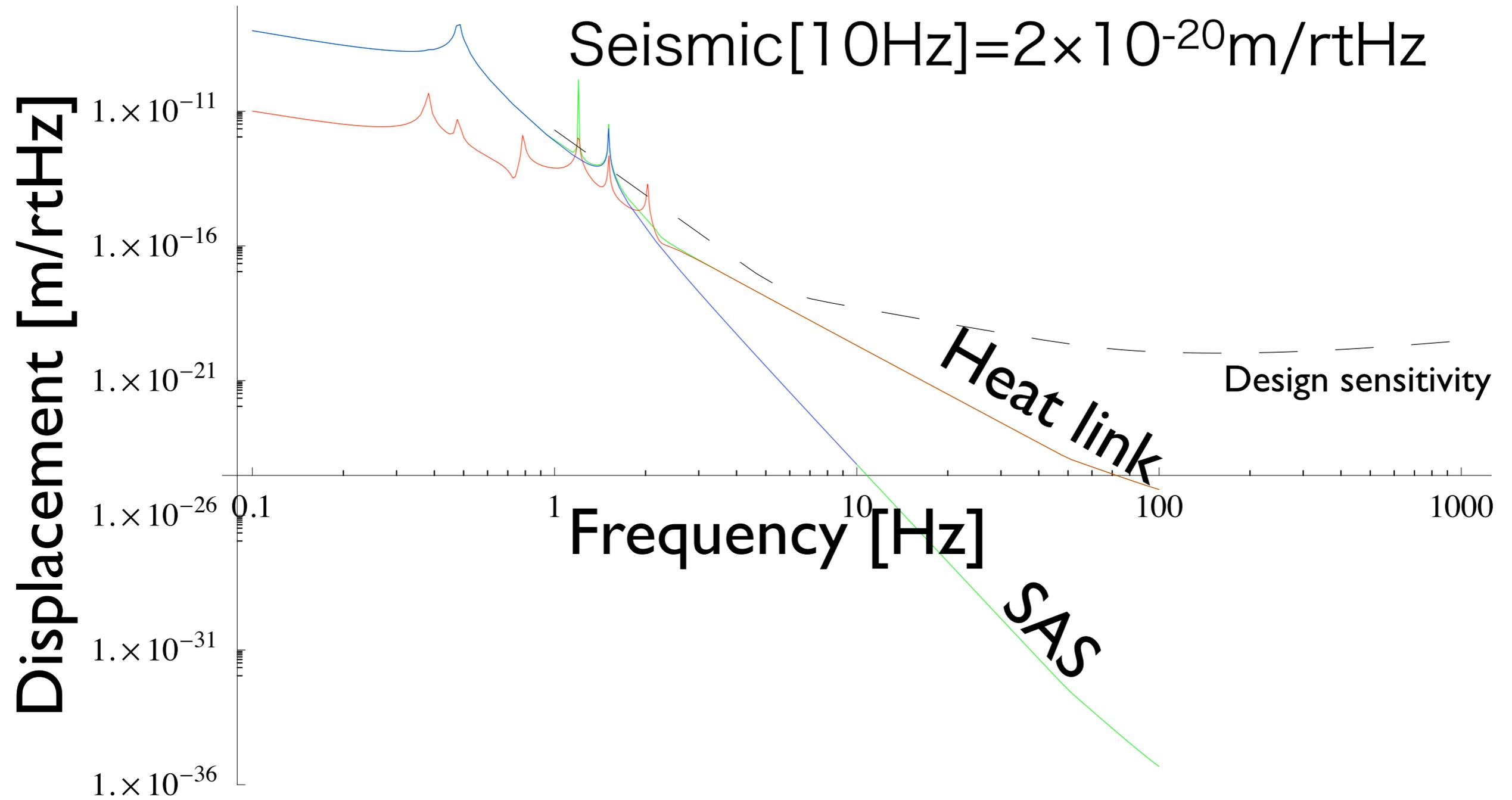
- Parameters
 - Laser power before PR mirror
 $P=75W$
 - PR gain 11
 - SR gain 15
 - Finesse 1550
 - Mirror $\Phi 250 \times 150$
 - Laser absorption 20ppm/cm
 - Absorption in coating 0.1ppm
- Laser absorption total=290mW
- 1%Z-X coupling
- Shield vibration = Kamioka seismic
- Vibration isolation of SPI: -40dB



現設計感度

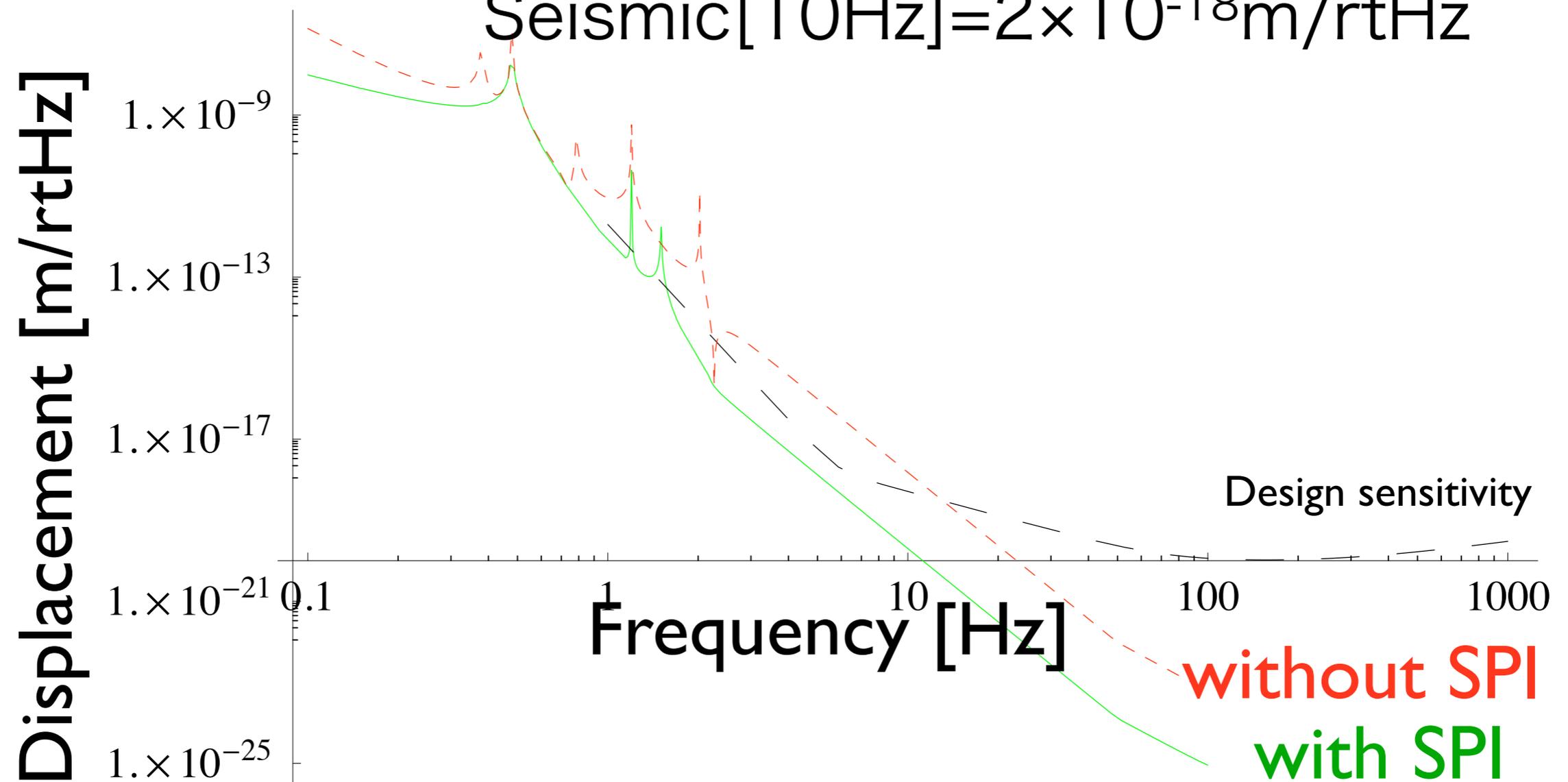
LCGT target [10Hz]= 5×10^{-19} m/rtHz

Seismic [10Hz]= 2×10^{-20} m/rtHz



LCGT target [10Hz]= 5×10^{-19} m/rtHz

Seismic[10Hz]= 2×10^{-18} m/rtHz



- SPIが無い場合、 seismic noise levelは100倍に増大する。
- しかし、元々大きなマージンが取られていたので感度の悪化は4倍。
- ヒートリンク設計で吸収できないか考えることにした。

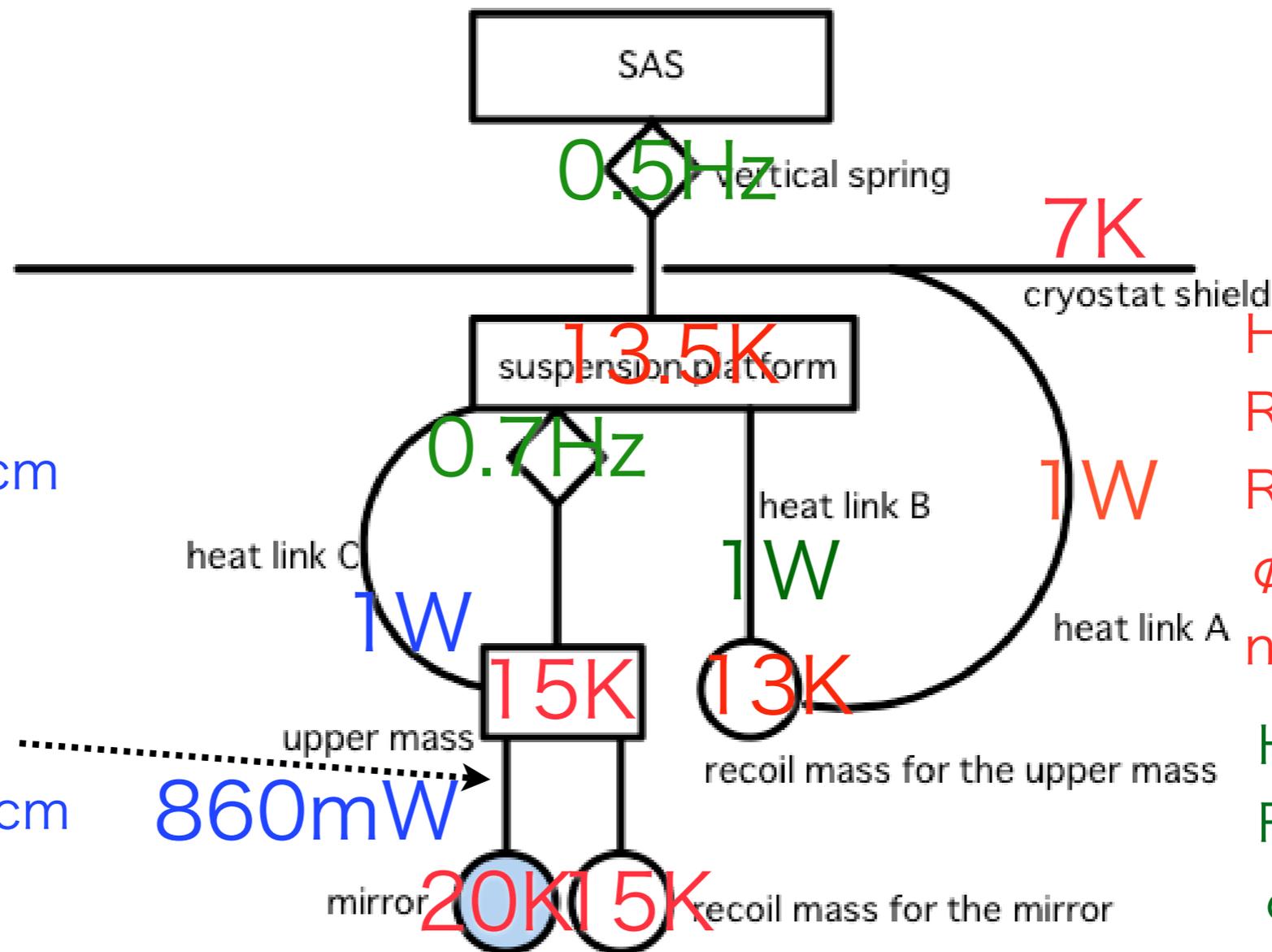
Requirement

- 振動が問題なので防振を一段挿入したい。
- 追加した防振部分と懸架系間の熱伝導を十分大きくとれることが必要。
- 余計なマスを低温部に出来るだけ増やさない。
- 振り子の構造を出来るだけ変えない。

New heat link design

- Upper mass用recoil massを防振ステージとして利用。
- Heat link Bは太いアルミ線を利用可能→熱伝導を大きくとれる。
- 4KPTを増強し、シールドの目標温度を8Kから7Kに。
- Z-X coupling: 0.1%
- Shield vibration: Kamioka level

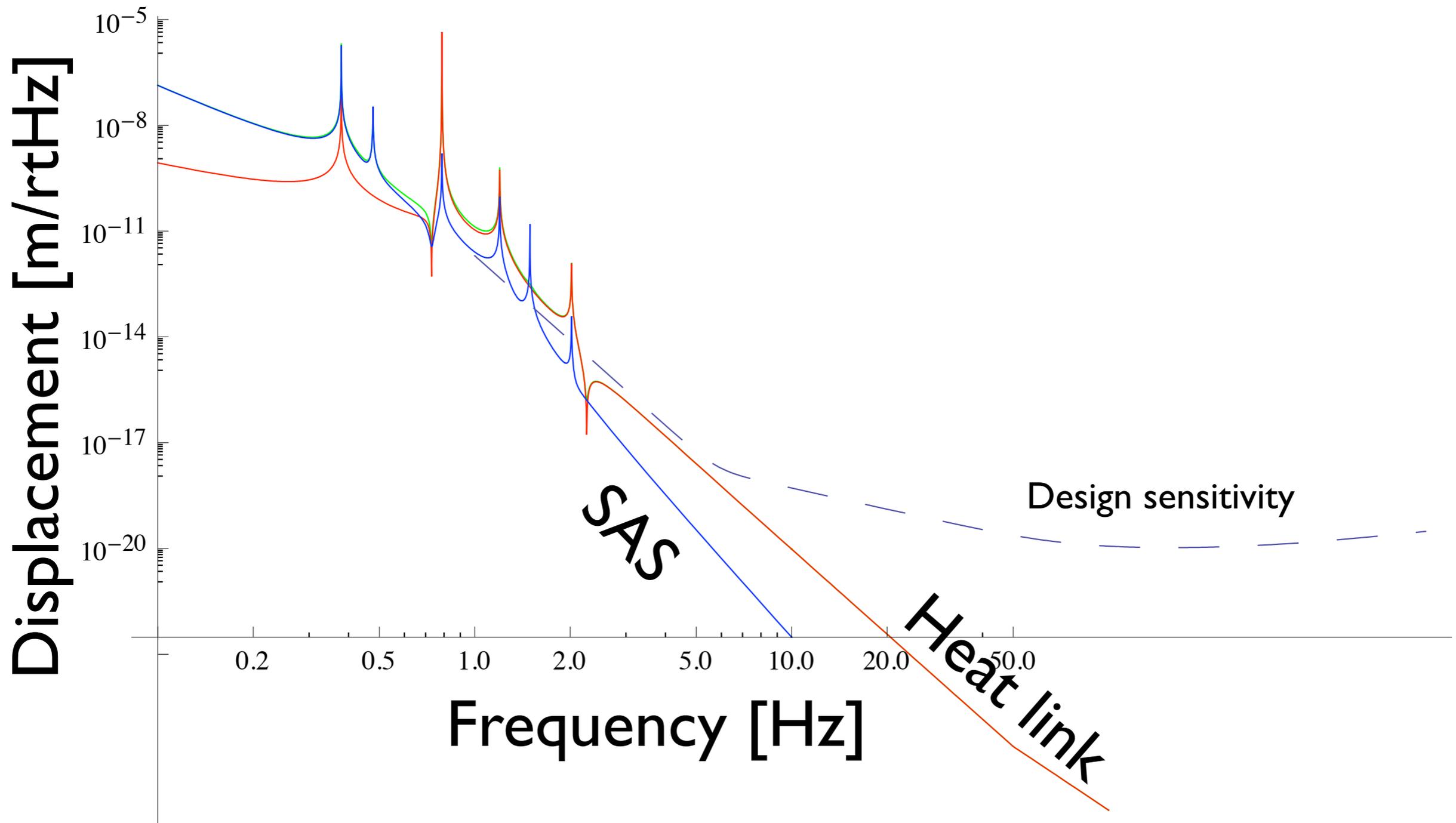
Heat link C
RRR6000
Radius of U: 20cm
 ϕ 3mm
number: 3
Sapphire fiber
4 × ϕ 1.8mm × 40cm



Heat link A
RRR6000
Radius of U: 25cm
 ϕ 1mm
number: 7
Heat link B
RRR6000
 ϕ 2mm
Length: 40cm
number: 4

LCGT target [10Hz]= 5×10^{-19} m/rtHz

Seismic[10Hz]= 1×10^{-20} m/rtHz



まとめ

- ヒートリンク防振のためにSPIを用いるか議論されている。
- SPIミラーとメインミラーのアライメントの両立が難しい。
- SPIを用いずにヒートリンクの防振を強化する方法を考えた。
- Upper mass recoil massを介してインナーシールドに接続する方法を検討した。
- 現実的なパラメータの範囲で目標感度を実現する設計が可能であることを確認した。

Appendix 2

SPIを重力波検出に用いた場合について

神田展行

平成 20 年 7 月 26 日

以下に、SPIを重力波検出に用いた場合に、どの程度の効果が得られるかの概算を示す。考慮すべき事項は、大別して2つ：重力波信号検出としての性能、偽信号棄却としての性能、である。計算にあたっては、LCGT デザインレポート (Version 2.0, April 4, 2007) の図 4.14 をもとにしたスペクトルの近似曲線 (下図 1) をもちいた。

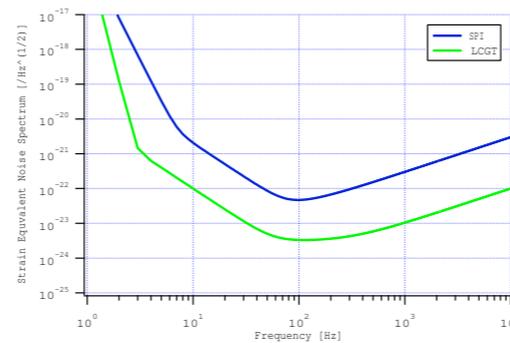


図 1: LCGT 主干渉計と SPI の雑音スペクトル

また前提条件として、

- 伝達函数補正後のそれぞれの干渉計の信号は、重力波に対する応答は同等で雑音レベルが違う
- 定常的な雑音については、2 台の干渉計は独立である
- 非定常な雑音のうち外乱に起因するものは、2 台の干渉計に電気信号で同程度の SNR であられる

と考えることにする。

1 重力波信号検出としての性能

1.1 コンパクト連星合体およびブラックホール準固有振動

これらの重力波は波形予想ができるので、マッチドフィルターを用いる場合として検出レンジを予想する。図2に重力波にたいする検出レンジ（条件：SNR > 10、天頂方向入射、波源の放射方向最適）を示す。コンパクト連星合体ではインスパイラル重力波、ブラックホール準固有振動ではリングダウン重力波（Kerr パラメーター 0.98、重力波へのエネルギー返還率 3%）である。

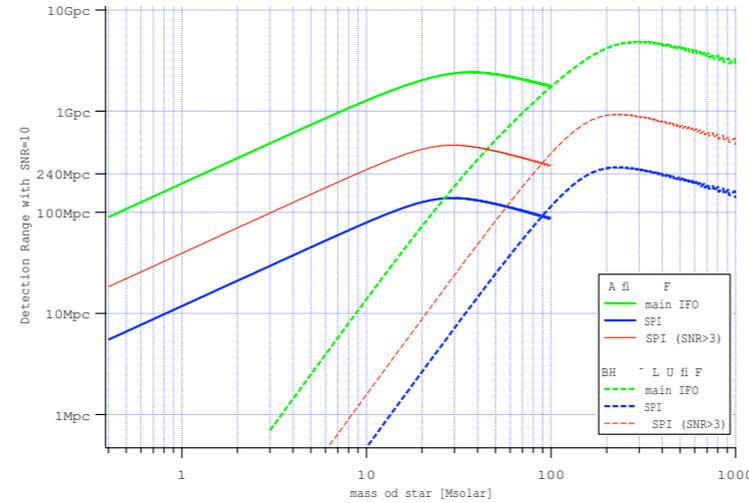


図 2: インスパイラルおよびリングダウン重力波についての検出レンジ
赤線は、SPI で SNR > 3 とした場合の検出レンジ

典型的な $1.4M_{\odot}$ の中性子星連星についての検出レンジは、LCGT 主干涉計で約 240Mpc、SPI で約 15Mpc である。

SNR で比較するならば、主干涉計で得られる SNR は SPI のそれに対して、インスパイラル波で約 16 倍（連星質量範囲: 1 ~ $10M_{\odot}$ ）、リングダウン波で 14~20 倍（BH 質量範囲: 100 ~ $1000M_{\odot}$ ）である。主干涉計と SPI は入射方向にたいする感度パターンは同じなので、この比率はどの方向の重力波源についても同じであり、adv.LIGO と LCGT のように全天を相補的に補うことはない。

重力波検出の有為さを補強するには、感度の悪い方の検出器でも SNR > 3 程度は必要であろう。このときの検出レンジは約 50Mpc である（図 2 の赤線参照）。LCGT 主干涉計が SNR > 10 を得るであろう連星合体信号のうち、SPI が SNR > 3 を得られるものは $(50/240)^3 \approx 0.9\%$ にすぎない。¹

¹ここでは話を簡単にするために離散的に SNR > 3 という条件を要求した。実際には、たとえばコヒーレント解析であれば 2 台の尤度の和で議論し、統計的な揺らぎも含めて有為性を評価する。

したがって、主干渉計が動作している限り、SPI の情報は連星合体／BH 準固有振動からの重力波検出には100回に1回くらいしか貢献しないと考えられる。
バースト重力波についても同様である。

1.2 連続波

積分時間1年間として、主干渉計およびSPIの連続波にたいする感度を図1.2にしめす。既知のパルサーが理論的上限値の重力波を出しているならば、LCGTで感度の届くもののうち1割以上はSPIでも観測できる感度である。

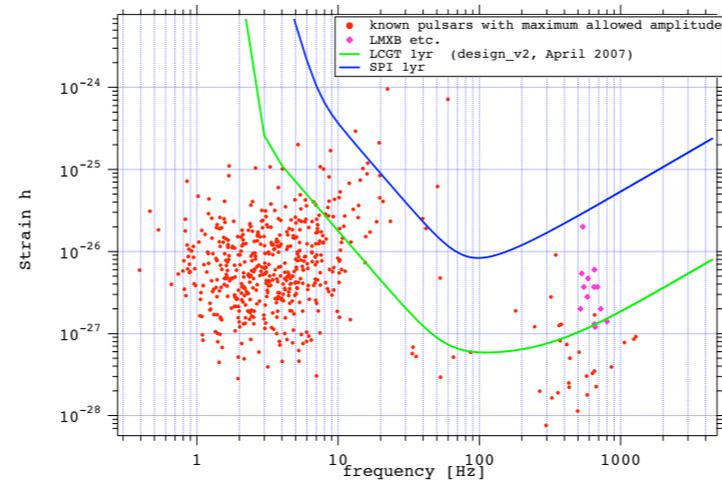


図 3: 連続波にたいする感度

点は、既知のパルサーならびに LMXB について、スピンドウン率等から理論的に赦される重力波の大きさを示す。

1.3 背景重力波

2台の干渉計で相関をとって得られる背景重力波信号のSNRは、ストレイノ雑音の逆数に比例する。100Hzにおいて得られる $h_0^2 \Omega_{GW}$ についての上限值は表1のようになる。

長時間積分によって1台の場合とは桁違いに感度が良くなるので、感度が主干渉計より1桁悪いSPIも背景重力波探査にはある程度役に立つと思われる。

ただし、最初に仮定した「定常的な雑音については、2台の干渉計は独立である」が重要である。もし雑音に相関がある場合は、その相関量を超えた背景重力波の探索はできない。

	$h_0^2 \Omega_{GW}(100Hz)$
LCGT 単独	$\sim 3.8 \times 10^{-5}$
LCGT 2台、1年積分	$\sim 4.8 \times 10^{-10}$
LCGT+SPI、1年積分	$\sim 6.7 \times 10^{-9}$

表 1: 背景重力波にたいする感度

2 偽信号棄却

SPIを veto にもちいて外乱に起因する疑似信号除去を行う場合を考える。想定するのは、連星合体やバースト波などの短時間イベントについてである。SPIをつかって除去 (veto) 可能なのは、地面振動、電源系からの雑音などの、干渉計システムの外側から主干渉計とSPIに共通に入ってくる外乱である。

「外乱に起因するものは、2台の干渉計に電気信号で同程度のSNRであらわれる」であるとすると、重力波振幅 h に換算した場合は2台で約1.6倍大きさが違うと認識される。したがって h で整合性を要求することで、SPIを偽信号棄却に用いる。この点は他の制御系や環境モニターなどの外部信号と同じく有用である。