

LCGTにおけるシリコンミラー検討

LCGT f2f meeting 2010/6/16 @ICRR
東大理 麻生洋一
協力: 宗宮さん、山元さん

このトークの主張

- 現在のデザインでは、LCGTの成否は高品質のサファイアミラーが入手可能かどうかにかかっている
- LCGTの要求を満たすサファイアミラーは現在存在しない
- 我々にはサファイアミラーを開発するリソースが無い
- 現状のプランは、LCGTの予算が通った後、メーカーにまとまった金を渡して大型高品質サファイアを開発してもらうというもの
- この開発によって要求仕様を満たす鏡が作れるという確実な保証は無い
- 国民の税金を150億円も使うのに、このように不確実なものに依存した計画を立てていいはずがない

私の本来の主張は、低温を一旦やめるべきというもの

しかし、もう既に何年も低温をやるということで予算請求をしてきたので低温を引っ込めることは出来ないらしい。

→ であるのなら、低温をキープしつつもサファイアに依存しない解も真剣に検討されて然るべき

今回は、シリコンミラーを使う可能性について調べてみた

サファイアミラーの問題点

現状では、LCGTの要求仕様を満たすサファイアミラーは存在しない

LCGT予算化後の開発に期待するしかない

- 大きなミラーは作れるのか? (直径25cm, 30kg, C軸)
- 光学吸収を低くかつ均一に抑えられるのか? (<20ppm/cm)
(c.f. Silica mirror 0.1ppm/cm, Heraeus Suprasil 3001)
- 複屈折は大丈夫か?
- 研磨精度は?
- サファイアファイバーで吊れるのか?

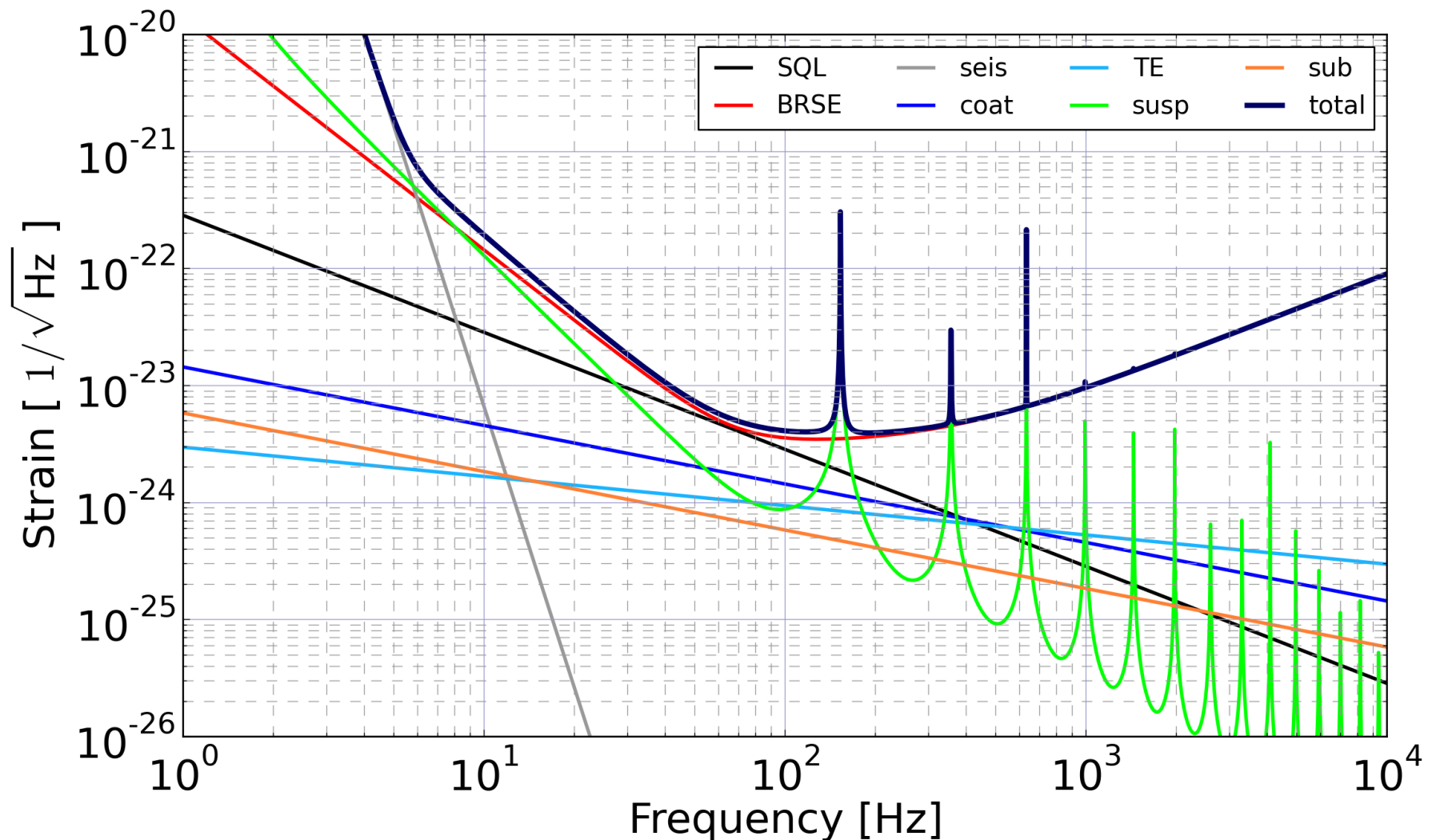
これだけの疑問点が未解決。

予算化後にすべてが上手くいくことを期待して進めるのは非常に危険

別の可能性も真剣に検討すべき

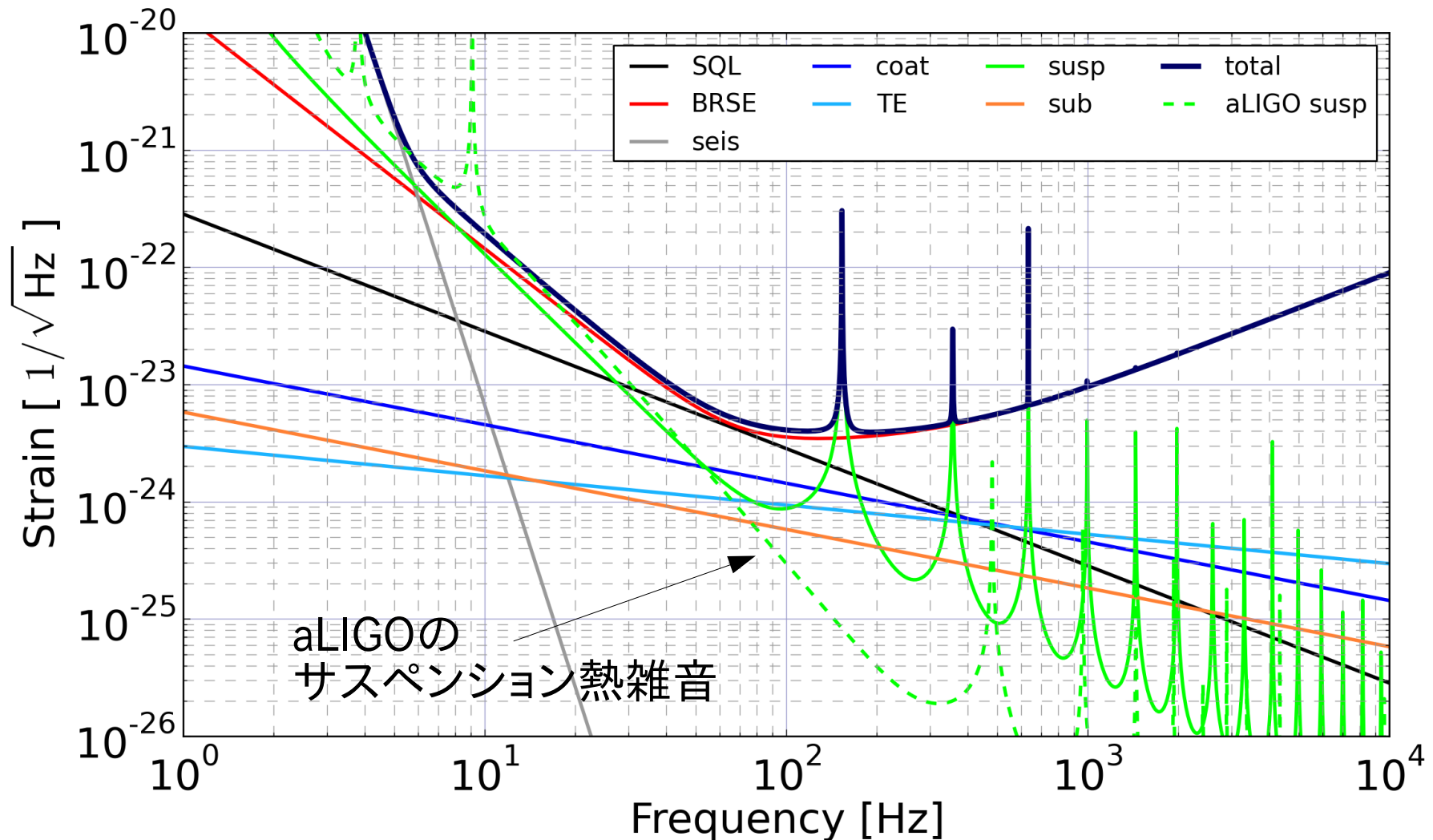
Sapphire LCGT デザイン感度

- 熱を逃がすために、太いサスペンションファイバーを使わなければならない
 - そのため、サスペンション熱雑音が増大する
 - バイオリンモードの周波数が最も感度の良い帯域にくる
- 干渉計の非線形性とカップルしてサイドローブを生成
理論的デザイン感度の到達は困難
特にインスパイラルレンジには致命的ダメージの可能性も



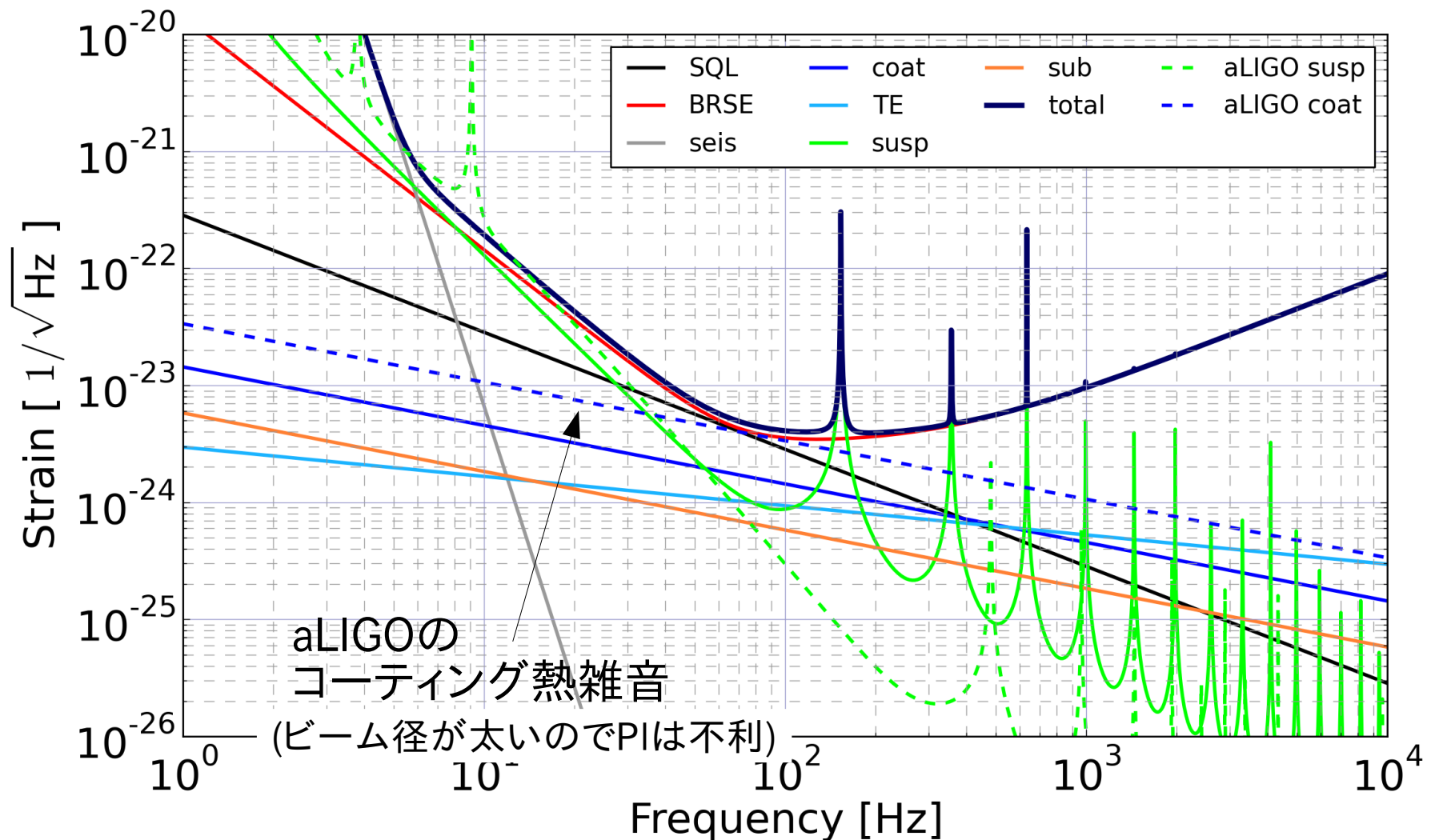
Sapphire LCGT デザイン感度

- 熱を逃がすために、太いサスペンションファイバーを使わなければならない
 - そのため、サスペンション熱雑音が増大する
 - バイオリンモードの周波数が最も感度の良い帯域にくる
- 干渉計の非線形性とカップルしてサイドローブを生成
理論的デザイン感度の到達は困難
特にインスパイラルレンジには致命的ダメージの可能性も



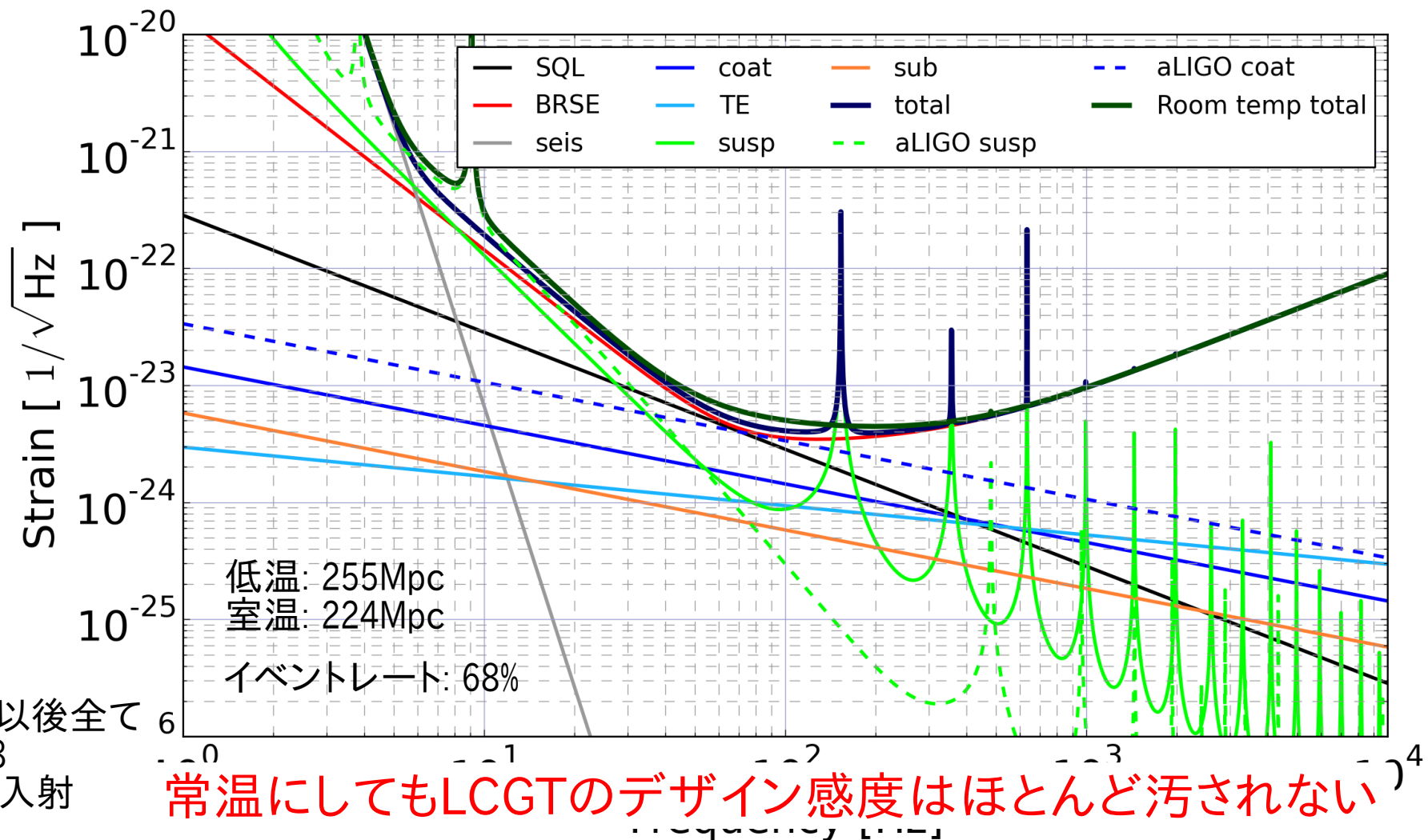
Sapphire LCGT デザイン感度

- 熱を逃がすために、太いサスペンションファイバーを使わなければならない
 - そのため、サスペンション熱雑音が増大する
 - バイオリンモードの周波数が最も感度の良い帯域にくる
- 干渉計の非線形性とカップルしてサイドローブを生成
理論的デザイン感度の到達は困難
特にインスパイラルレンジには致命的ダメージの可能性も



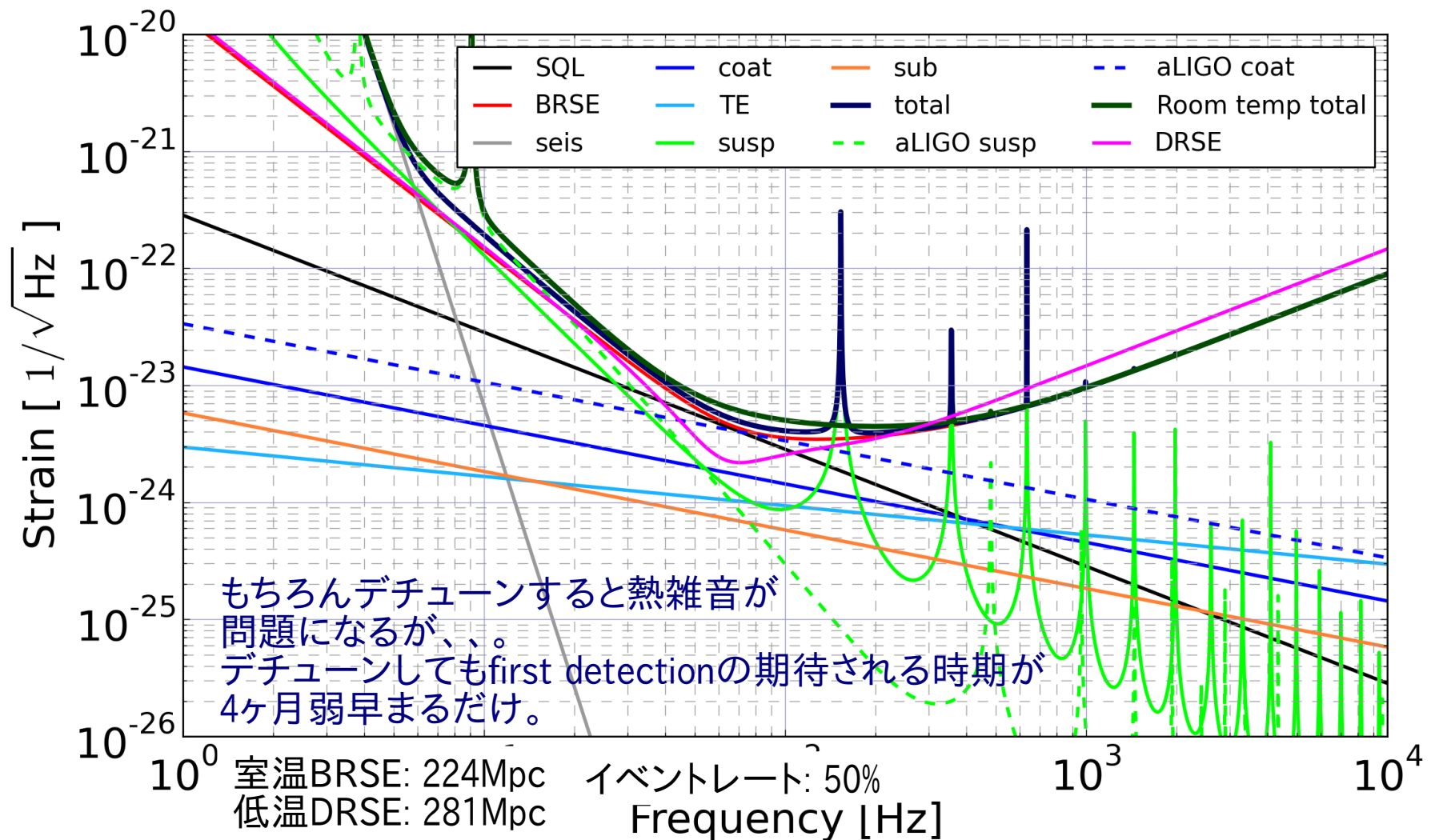
Sapphire LCGT デザイン感度

- 熱を逃がすために、太いサスペンションファイバーを使わなければならない
 - そのため、サスペンション熱雑音が増大する
 - バイオリンモードの周波数が最も感度の良い帯域にくる
- 干渉計の非線形性とカップルしてサイドローブを生成
理論的デザイン感度の到達は困難
特にインスパイラルレンジには致命的ダメージの可能性も



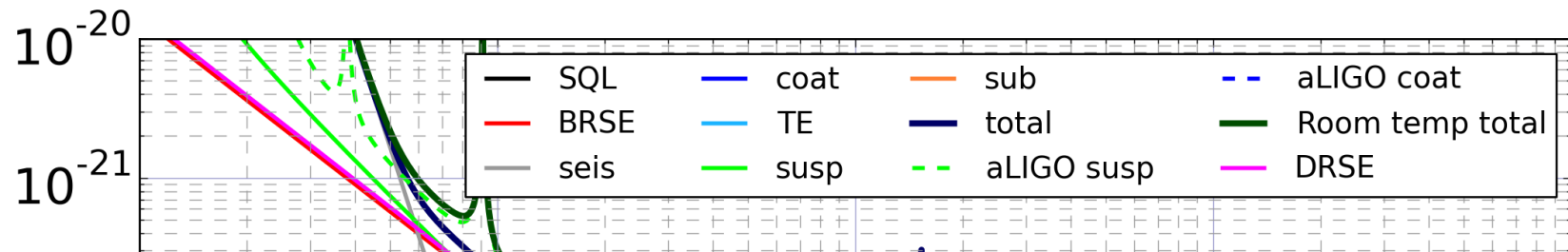
Sapphire LCGT デザイン感度

- 熱を逃がすために、太いサスペンションファイバーを使わなければならない
 - そのため、サスペンション熱雑音が増大する
 - バイオリンモードの周波数が最も感度の良い帯域にくる
- 干渉計の非線形性とカップルしてサイドローブを生成
理論的デザイン感度の到達は困難
特にインスパイラルレンジには致命的ダメージの可能性も

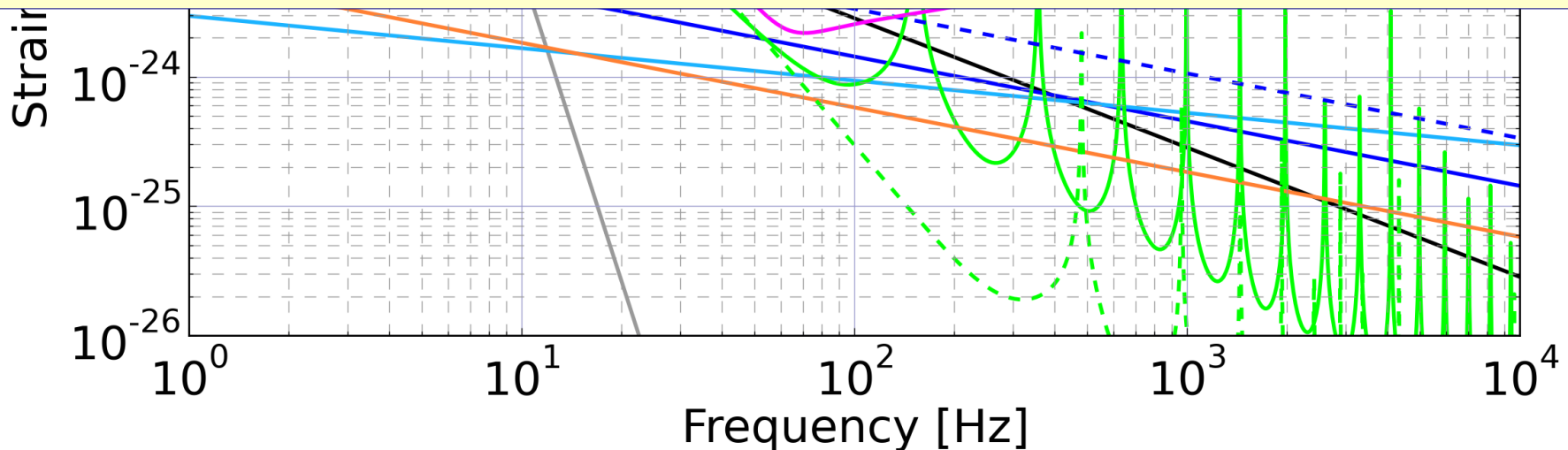


Sapphire LCGT デザイン感度

- 熱を逃がすために、太いサスペンションファイバーを使わなければならない
 - そのため、サスペンション熱雑音が増大する
 - バイオリンモードの周波数が最も感度の良い帯域にくる
- 干渉計の非線形性とカップルしてサイドローブを生成
理論的デザイン感度の到達は困難
特にインスパイラルレンジには致命的ダメージの可能性も

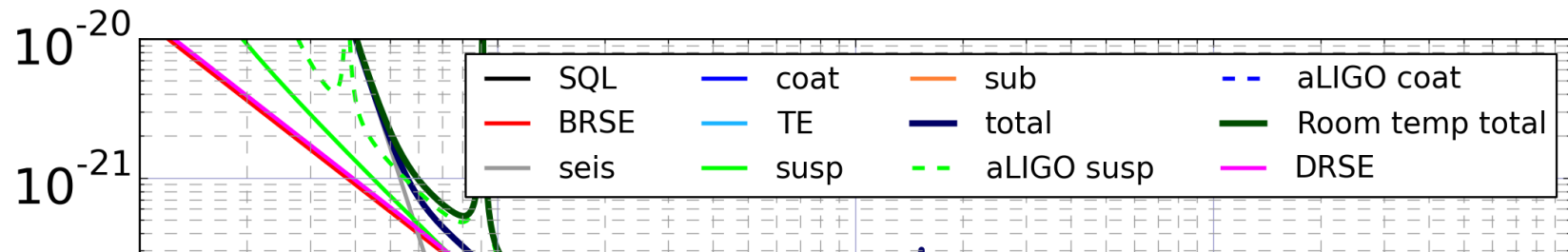


常温でいいんじゃないの？

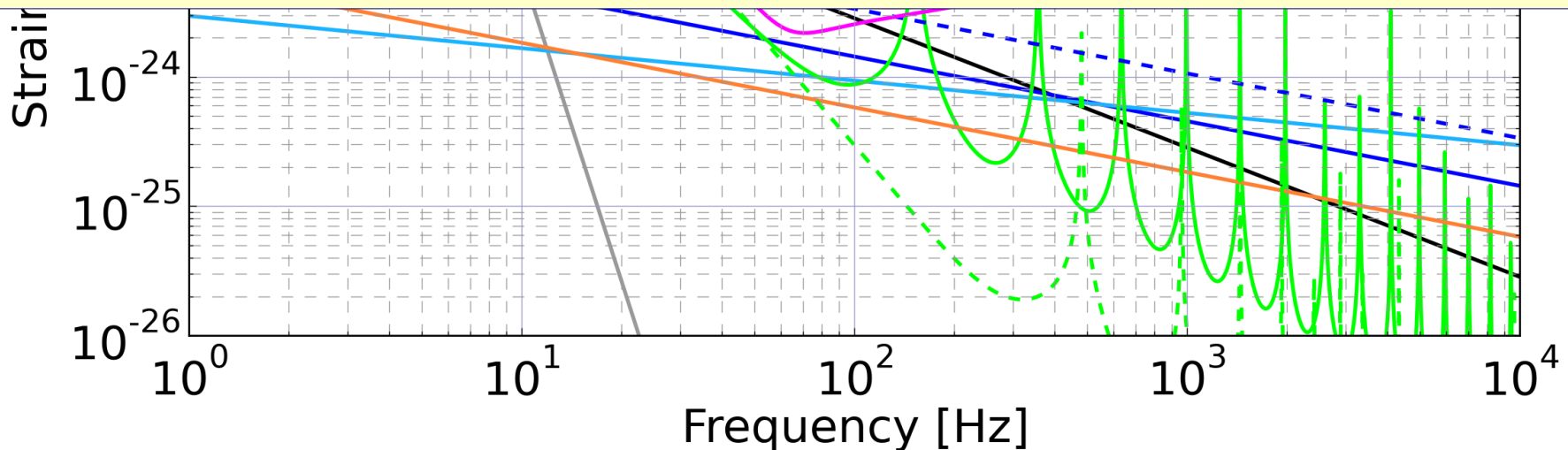


Sapphire LCGT デザイン感度

- 熱を逃がすために、太いサスペンションファイバーを使わなければならない
 - そのため、サスペンション熱雑音が増大する
 - バイオリンモードの周波数が最も感度の良い帯域にくる
- 干渉計の非線形性とカップルしてサイドローブを生成
理論的デザイン感度の到達は困難
特にインスパイラルレンジには致命的ダメージの可能性も



常温でいいんじゃないの？
でもどうしても冷やしたいのなら、シリコンはどうか？



シリコンの材料特性

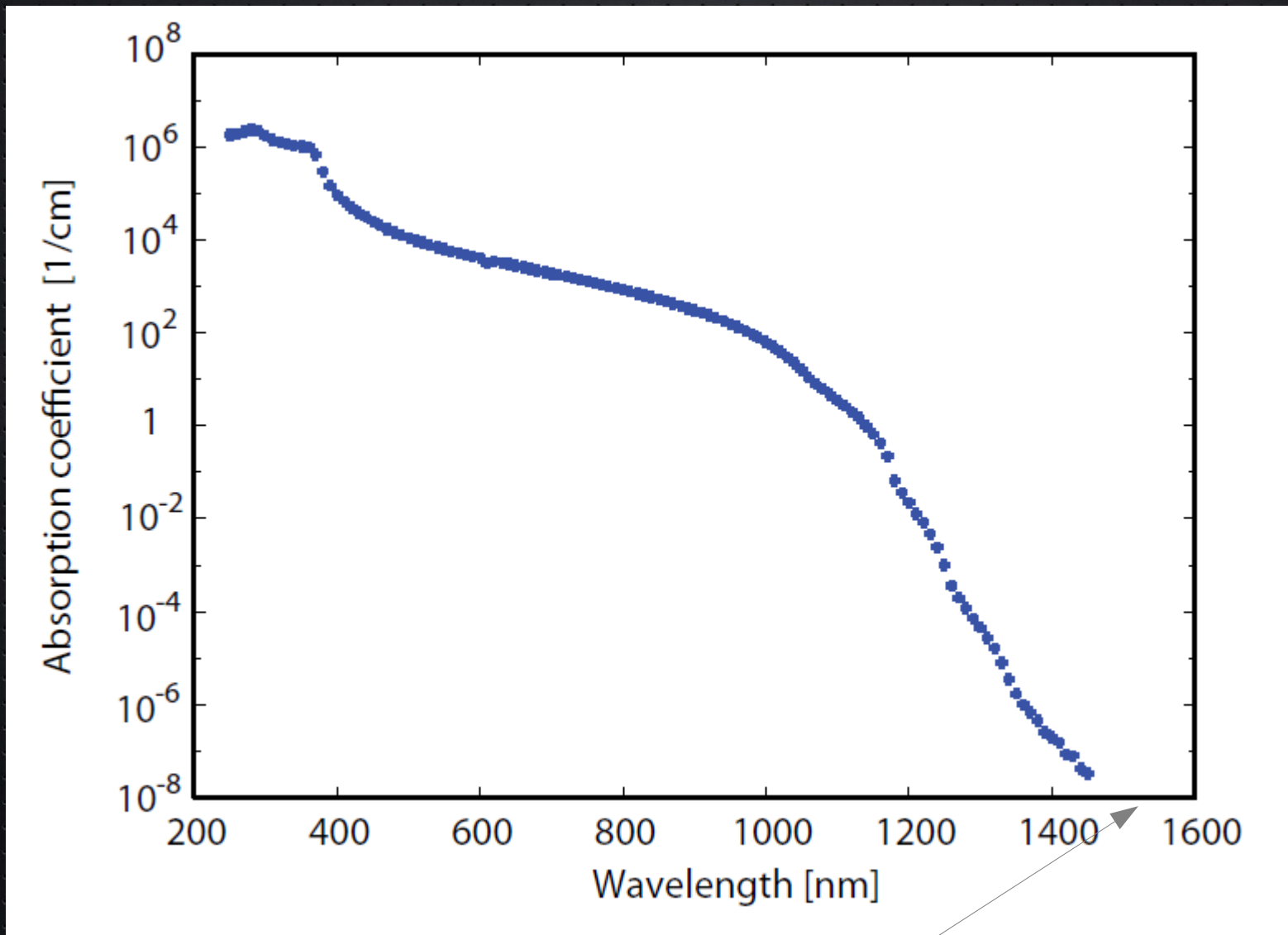
- 地球上で炭素に次いで最も豊富な元素
- ダイヤモンド立方構造 (等方性)
- 密度: 2.329g/cm^3 @ 室温
- ヤング率: 約 100GPa



重力波検出器用のミラーとして有用な性質

- 高い機械Q: 低温で 10^9 [1]
 - 基材ブラウン運動の低減
- $1.5\ \mu\text{m}$ 帯で低い光学吸収: 0.01ppm/cm 以下 [2]
 - ITM発熱の低減 (高いPRG, 低い腕Finesseが可能に)
 - 熱レンズ低減
- 高い熱伝導率: 20K付近で数千 W/m/K [3]
 - 低温干渉計における排熱効率が低い
 - 熱レンズ低減
- 熱膨張率のゼロ点: 120Kと18K付近 [4]
 - Thermoelastic Noise低減

光学吸収



1550nmでの吸収はまだ測られていない[5]

1550nmレーザー

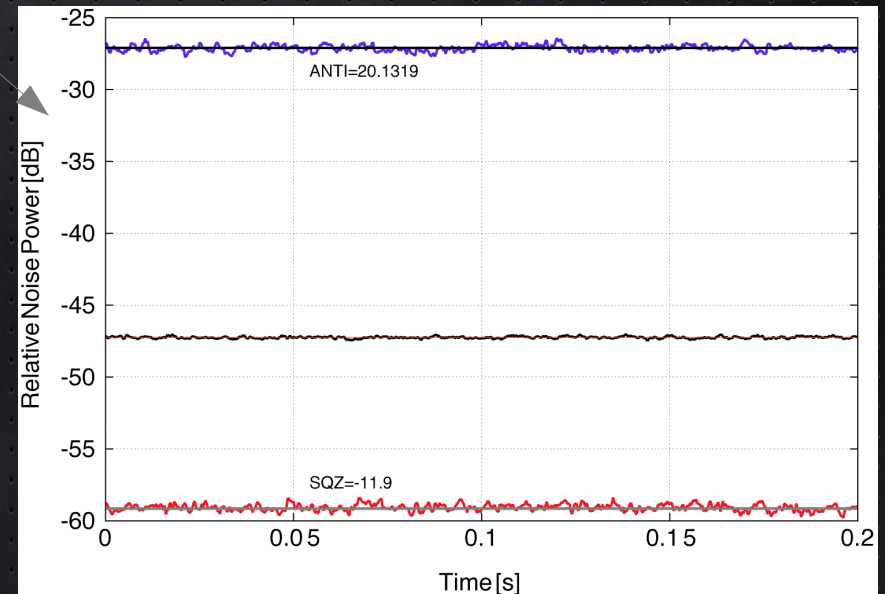
- シリコンは1064nmで不透明
- $1.5\mu\text{m}$ 付近の光を使う必要がある
- 1550nmは光通信の技術を活用できる
- Erbium-doped fiber laser 2Wがカタログ品として売られている
- 40Wのfiber amplifierも売っている

重力波用レーザーの現状

AEIにて20Wのファイバーレーザーが動いている
近いうちに100Wに達する見込み
1550nmで12dB@5MHzのSqueezingにも成功

デメリット

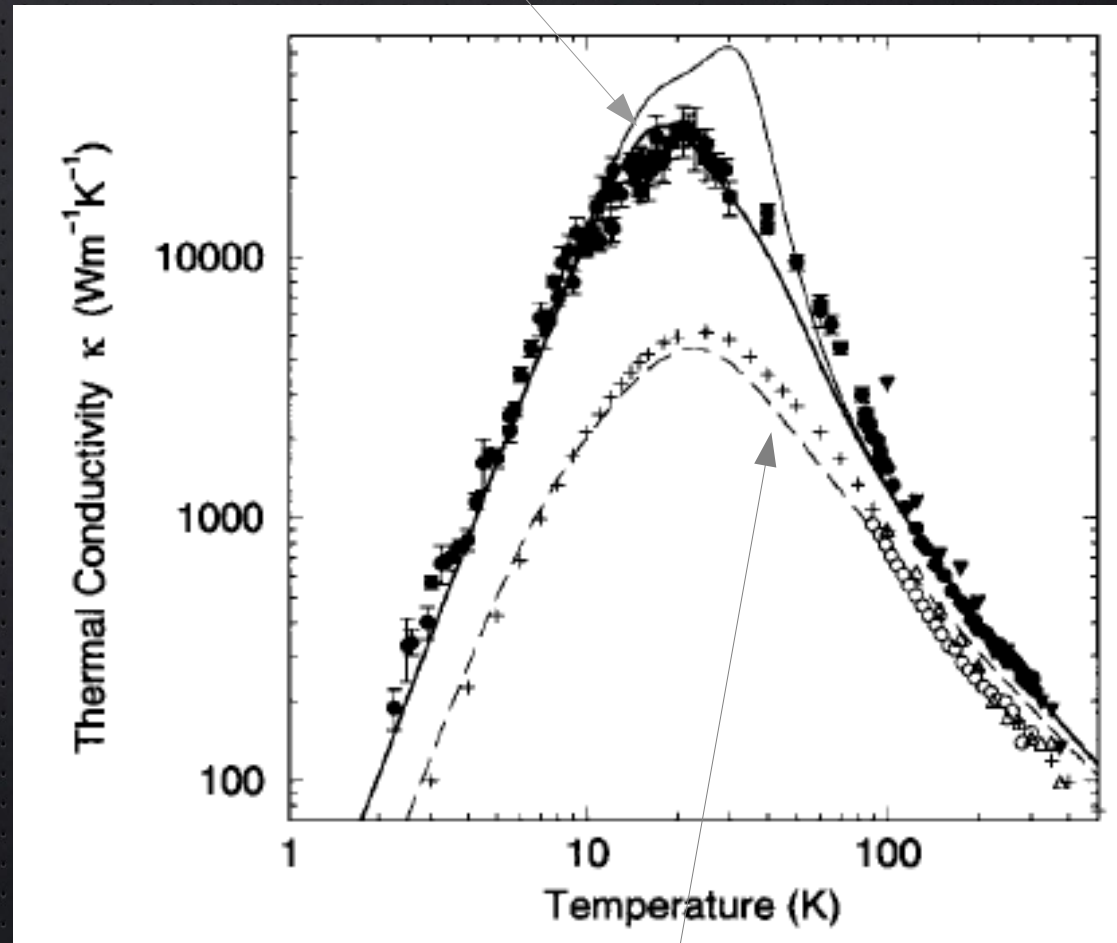
1064nmと比べると散射雑音が $\sqrt{1.5}=1.22$ 倍悪化する。
ただし、SQLは波長に依存しない。



熱伝導率

Siの同位体をSi28にそろえたサンプルが購入可能(\$1000/g)

ただし、ファイバーの場合表面におけるフォノン散乱が熱伝導率を決める。
素材そのものの熱伝導率を高めてもあまり意味がない。



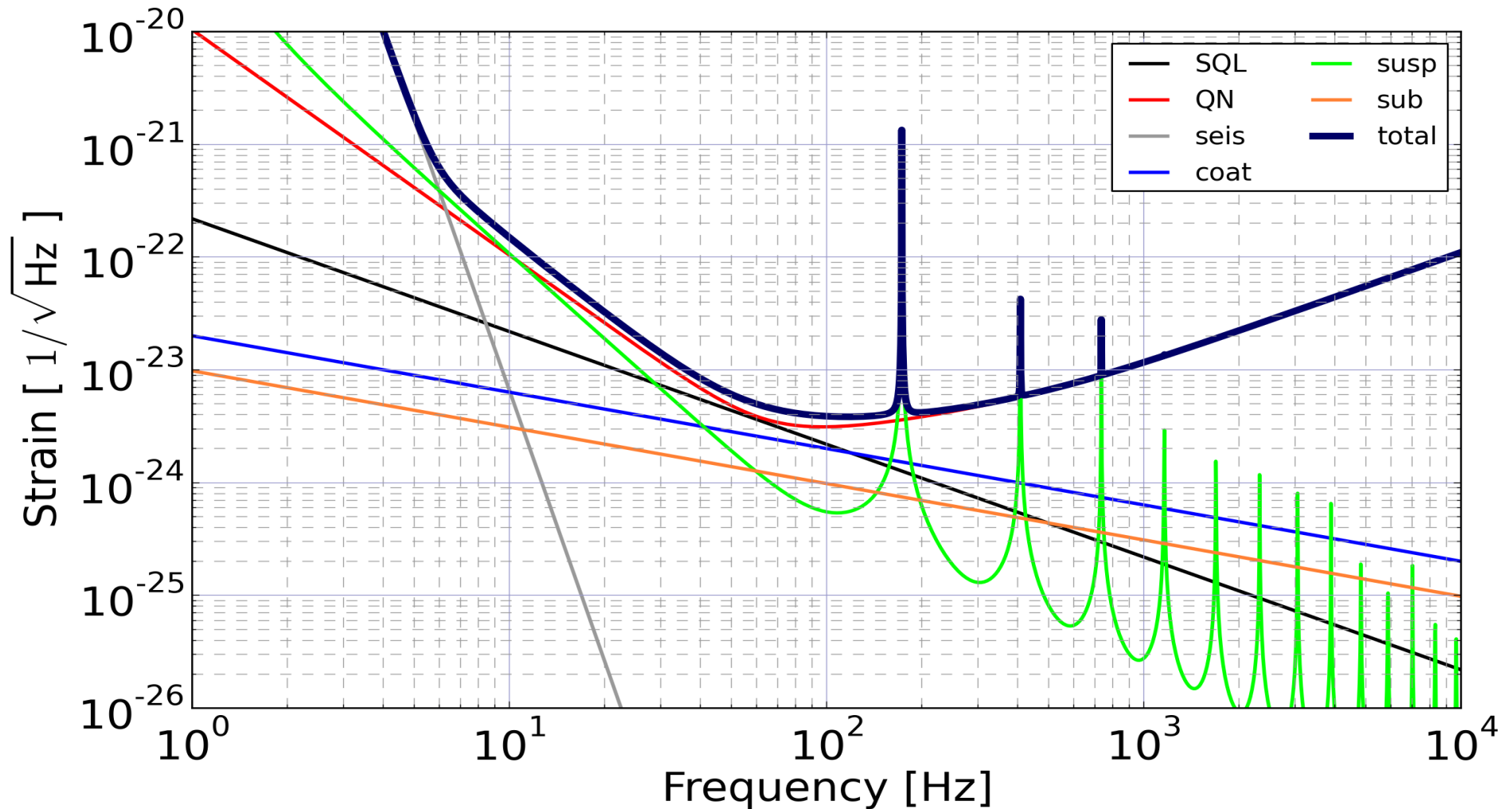
通常のシリコン

シリコンミラーを使った場合の感度

低吸収なので
可能

ミラーマス=50kg (直径30cm x 厚み30cm)

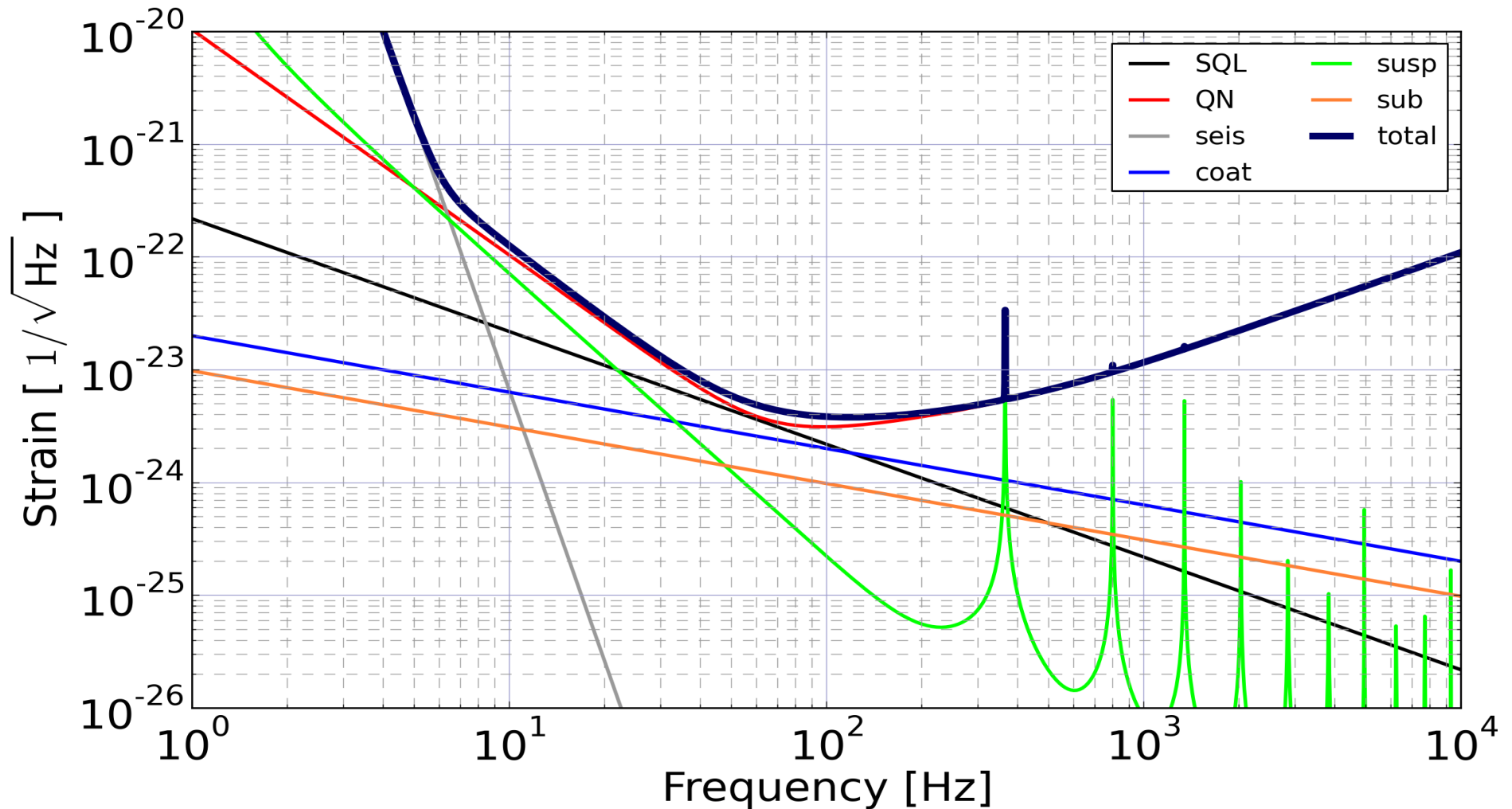
インスパイラルレンジ = 286Mpc



シリコンミラーを使った場合の感度

サスペンションをファイバーからリボンに変更

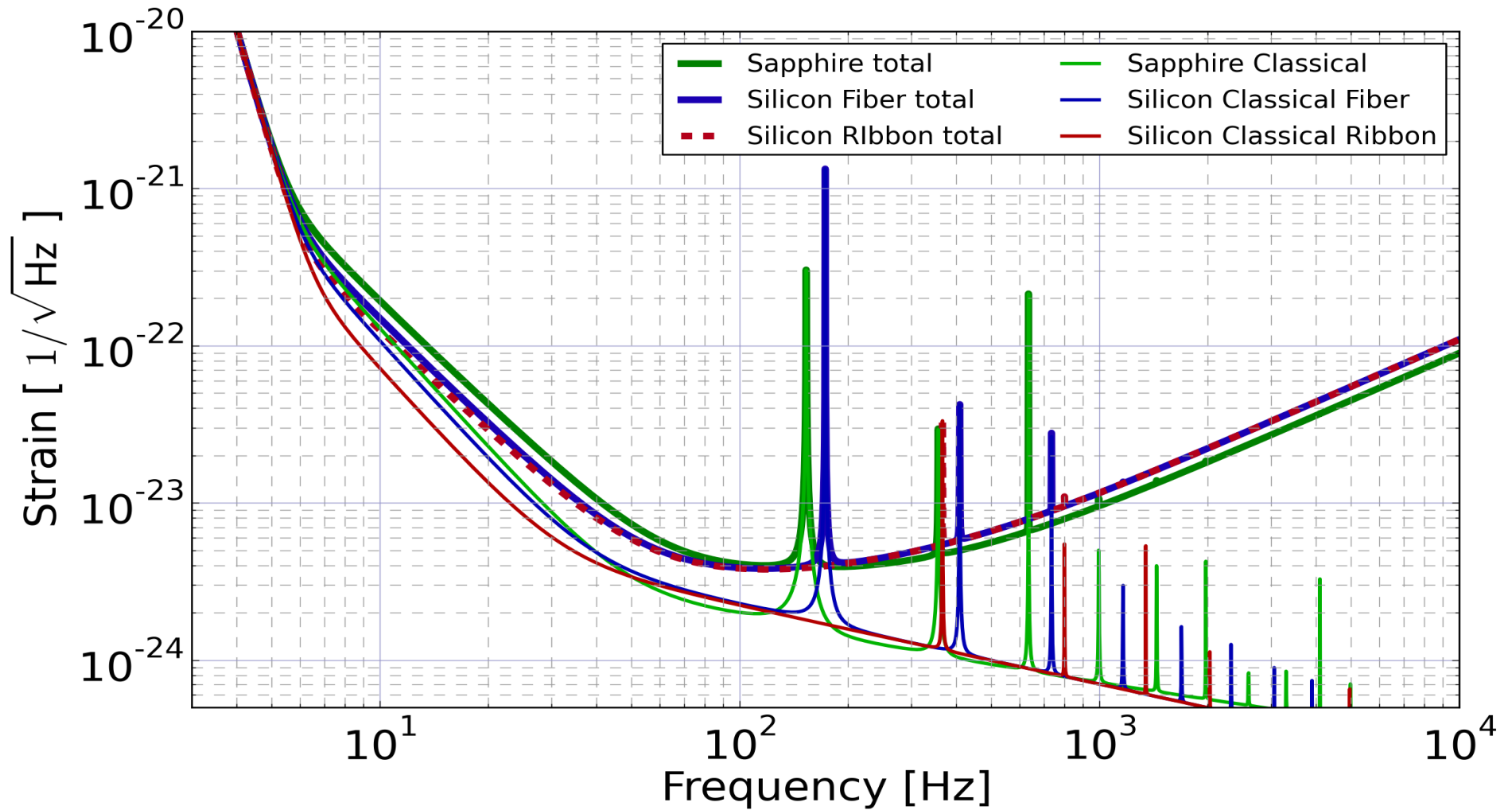
インスパイラルレンジ = 296Mpc



感度比較

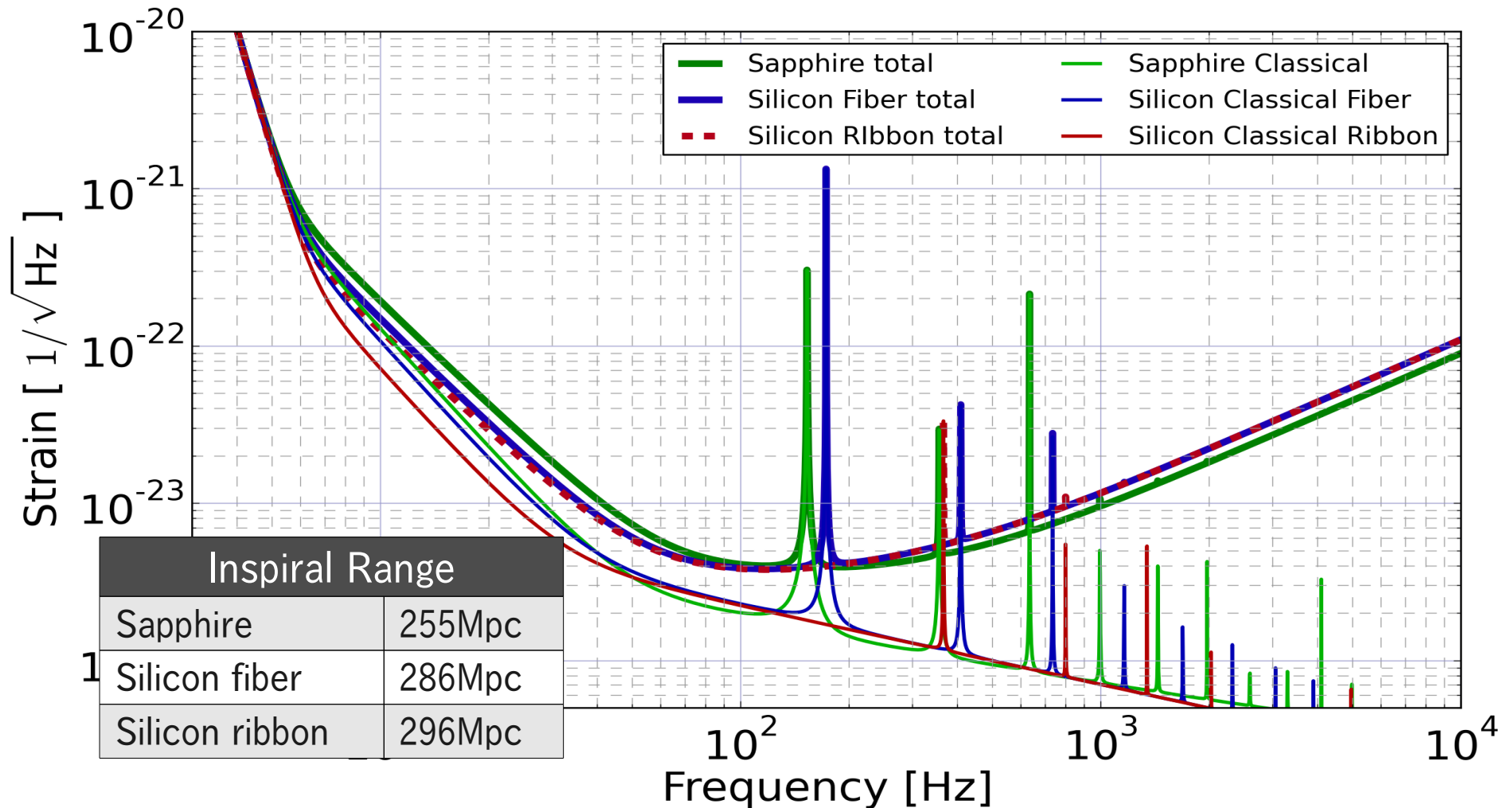
量子雑音: マスが重いので輻射圧雑音が減り、波長が長いので散射雑音が増加
古典雑音: ほぼ、サスペンション熱雑音+コーティング熱雑音
マスが重いのでサスペンション熱雑音が大幅減少

注: シリコン向けの量子雑音最適化は行っていない。



感度比較

- シリコンならば、サファイアと同等以上の感度を達成可能
- 量子雑音の最適化を行えば、若干のインスパイラルレンジ向上の可能性も
- ファイバーではシリコンでもバイオリンピークが大きい
- リボンにすれば、バイオリンの問題はかなり低減(これはサファイアも同じ)



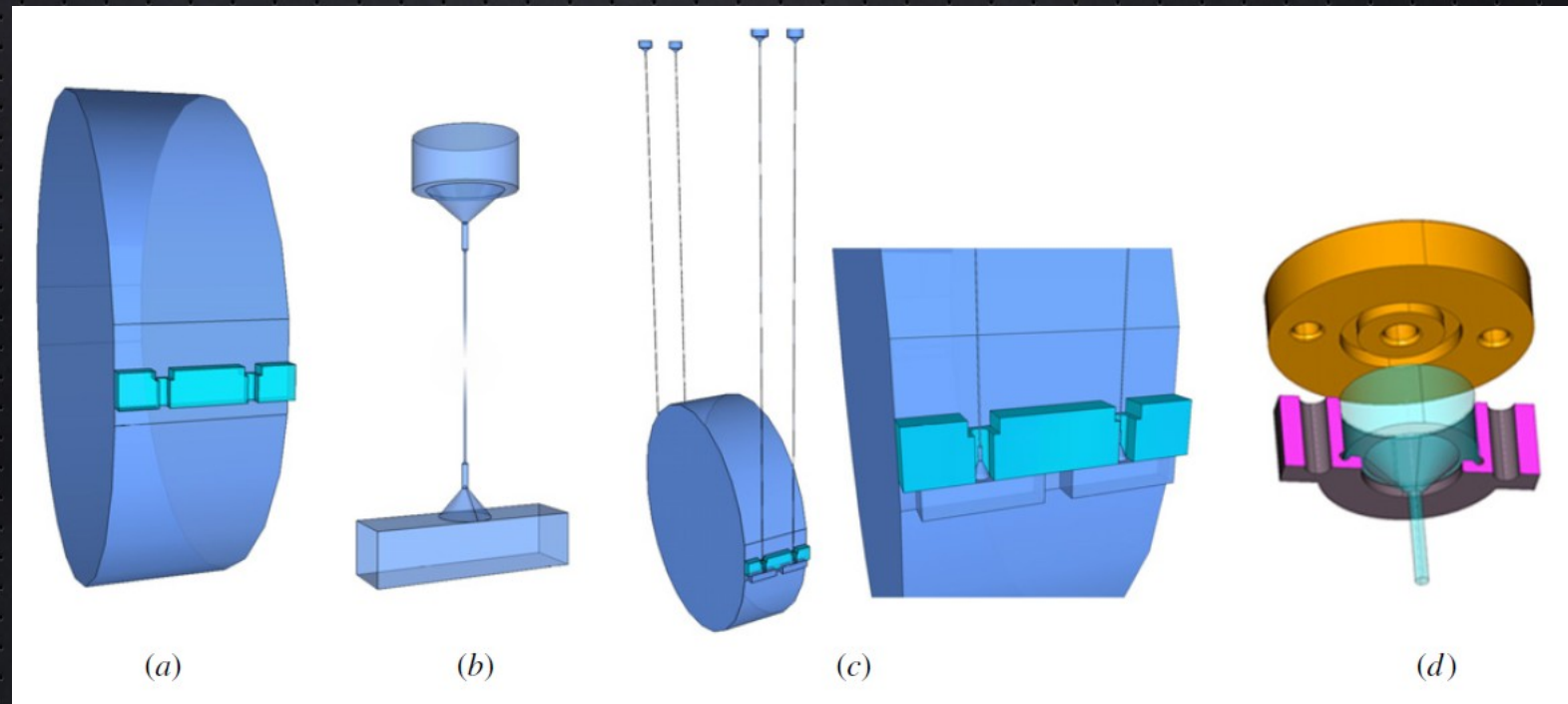
直径30cmのシリコンミラーは作れるか？

- 半導体業界では30cmのインゴットが標準になりつつある。
- 次世代は45cmが標準に。既に制作可能で、IC等の製造装置も45cm対応を始めている。
- 大口径ウェーハは半導体製造コスト削減に直結
 - 我々とは比較にならない資金が投入されている
- 半導体に要求されるシリコン純度は11N以上
- 半導体グレードのシリコン単結晶がそのままGWミラーに使えるかはテストが必要

鏡は吊れるのか

- シリケートボンディングの強度はサファイアの約10倍(10Mpa弱) [6]
- 50kgのマスを支えるのに必要なボンディング面積は約50mm²
- Fused Silicaの場合と同様のMonolithic Suspensionは製作可能か？
- SiliconのWelding ?

VirgoのMonolithic Suspension [7]



複屈折

- ITMの複屈折による偏光回転は、干渉計のコントラストを低下させる。
- 屈折率楕円体の軸と入射光偏光方向を合わせればよい --> 精度の問題
- 屈折率の軸が結晶内で不均一だと、入射光が高次モードへ散乱される

関係する量: 複屈折の絶対値(δn), 複屈折の揺らぎ(σ)

徳成論文[11]では、サファイアの複屈折 $\delta n=7 \times 10^{-3}$ $\sigma=4 \times 10^{-7}$
(注: C軸結晶ではない)

- $\delta n=7 \times 10^{-3}$ だと、入射光の偏光と屈折率楕円体の軸は 4° 程度の精度で合わせないと、コントラストが99%以下になる。
- [11]によるとLCGTの複屈折揺らぎ(σ)に対する要求値は 8×10^{-8}
-- 上記測定値はこれを満たさない

シリコンは等方性結晶なので、原理的には複屈折はゼロ
ただし、点欠陥によるストレインから微弱な複屈折が起こる

実測値、 $\delta n = 7 \times 10^{-8}$ $\sigma=2.74 \times 10^{-8}$ [12]
(001)方向の場合。例えば(110)だと $\delta n = 3 \times 10^{-6}$ $\sigma=9 \times 10^{-8}$)

- $\delta n=7 \times 10^{-8}$ だと、二つのITMの屈折率軸が 65° ズレても大丈夫。
- σ も要求を満たす。
- (001)面をミラーの面と一致させたい。--> Cz法では種結晶の結晶面方向をでインゴットの結晶面は決まる。

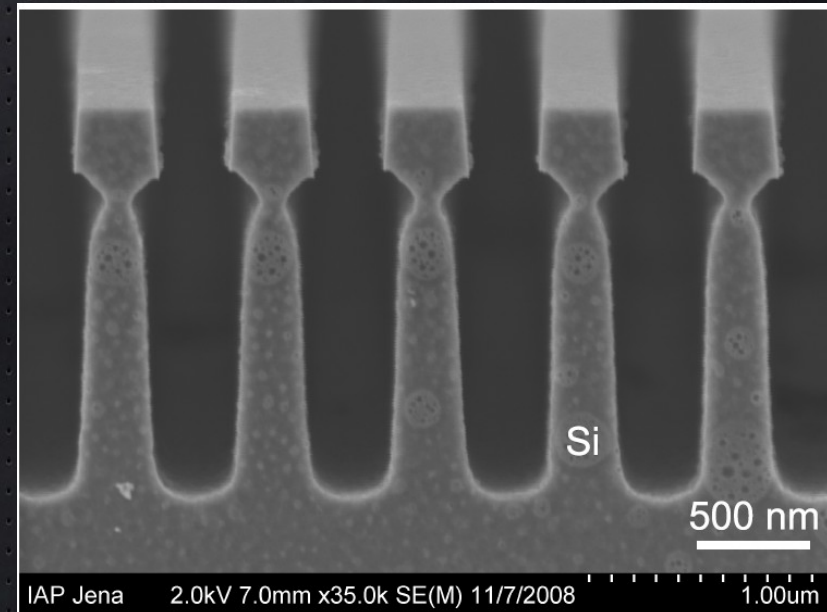
おそらくシリコンの場合、複屈折は問題にならない。

コーティング

- コーティング熱雑音は100Hz近辺で最も大きな古典雑音
- $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ コーティングでは、 Ta_2O_5 が主な機械ロス原因
- Ta_2O_5 は高屈折率レイヤー($n=2.2$)として使われる。
- Siの屈折率は3.48なので、 SiO_2 と組み合わせるとコーティング材料として使える。
- Siは機械ロスが小さいのでコーティング熱雑音の改善が期待される
(ただし、 SiO_2 は低温でロスが増大)
- Siも SiO_2 も1550nmで吸収が小さいので、コーティングにおける吸収を低減できるかも。
(すると、サスペンションファイバーを細くできるので、バイオリンピークを避けられる)
- アモルファスSiのフィルムで低温において高いQを出したという報告もある[8,9]

シリコン表面に微細構造を作り、回折によって高反射率を実現する
Monolithic coatingも研究されている [10]

反射率99.8%



サファイアとの比較

	サファイア	シリコン
大きな結晶	C軸成長は難しい C軸切り出し?	半導体グレードのものは既に存在する
複屈折	大(現状、要求値を満たさない)	小 (問題にならない)
光学吸収	大 (20ppm/cm以上)	小 (0.01ppm/cm)
シリケートボンディング	強度1MPa程度	強度10MPa弱
屈折率	1.7	3.5 (Monolithic Coatingが可能)
加工性	硬い	サファイアよりは若干柔らかい
波長	1064nmの技術が使える	1550nmへ乗り換える必要
開発の見通し	大きなC軸サファイアの需要がない	半導体業界からの大型化への需要 ETによる活発なR&D
一般受け	カッコいい	シリコンと誤解されると悲惨

まとめ

- LCGTの要求仕様を満たすサファイアミラーはまだ存在しない
- サファイアミラーに依存したの計画は危険
- シリコンはサファイアに比べるとまだ実現性が高そう
- ただし、1550nmへの波長変更が必要
- 材料開発はLCGTグループだけではリソースが足りない
 - ETグループ(Glasgow, Jena等)との協力を進めるべき
 - シリコンはその点で有利
- もちろんシリコン以外にも、半低温など別の可能性も検討すべき
- とにかくサファイアに対するリスクヘッジが必要

参考文献

- [1] D. F. McGuigan, et al. 1978 J. Low Temp. Phys. 30 621
- [2] M. Green and M. Keevers 1995, Progress in Photovoltaic research & Appl. 3 189
- [3] T. Ruf, et al., Solid State Communications 115 (2000) 243
- [4] Y. Okada and Y Tokumaru, J. Appl. Phys. 56 (1984) 314
- [5] R. Schnabel et al, arXiv:0912.3164v1
- [6] A. Dari, et al., Class. Quantum Grav. 27 (2010) 045010
- [7] M. Lorenzini, et al., Class. Quantum Grav. 27 (2010) 084021
- [8] X. Liu, et al., Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4418
- [9] X. Liu, et al., Materials Science and Engineering A 442 (2006) 307
- [10] F. Bruckner, et al., Phys. Rev. Lett. 104, 163903 (2010)
- [11] M. Tokunari, et al., Submitted to CQG
- [12] T. Chu, et al., Microelectronic Engineering, 66 (2003) 327