

Study of a cryogenic suspension system
for the gravitational wave telescope KAGRA

重力波望遠鏡KAGRAのための 低温懸架システムの研究

東京大学 理学系研究科 天文学専攻
陳 聃

ICRR修士博士発表会 2015/2/20 ICRR

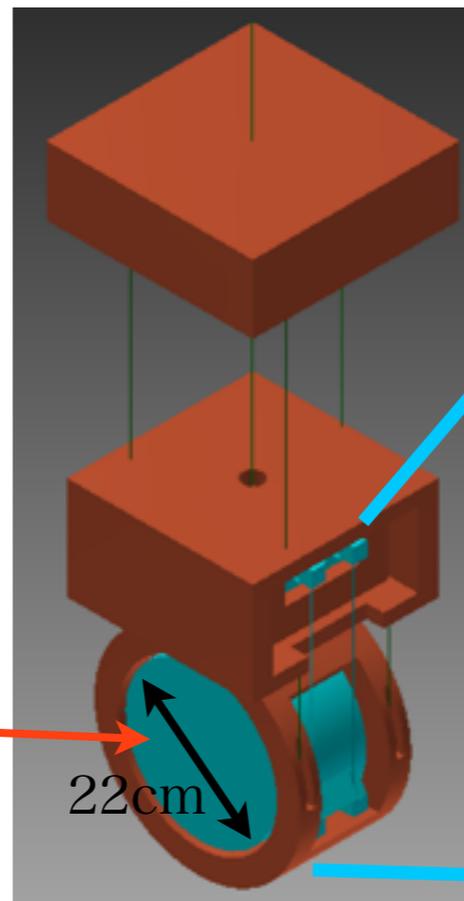


概要

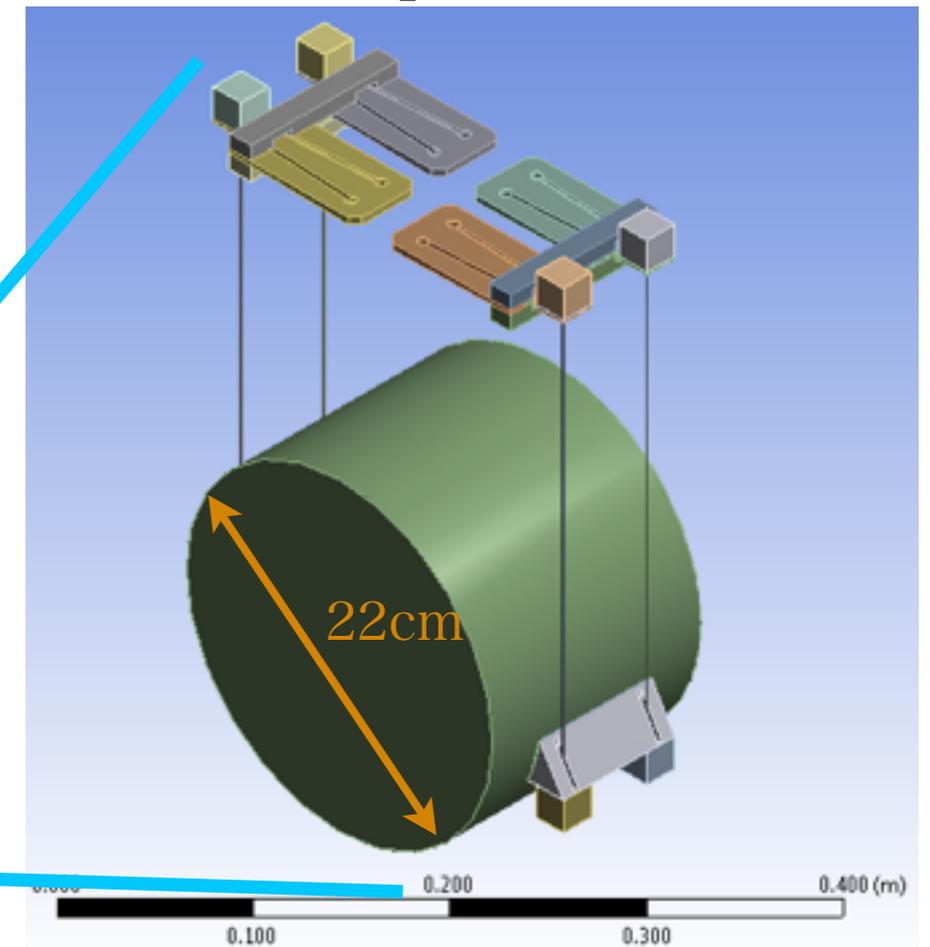
重力波望遠鏡KAGRAの低温懸架システムのための要素試験を行った。



Cryogenic suspension



Cryogenic sapphire suspension



○ main mirror
鏡を重力波に対して(共振周波数以上で)自由質点になるように吊るされている。

Cryogenic sapphire suspensionは熱雑音、鏡の温度、強度の面から、どれも要求値を満たす設計ができた。

もくじ

- ★重力波及びその望遠鏡について
- ★KAGRAと本研究の位置づけ
- ★Cryogenic sapphire suspension
 - ◆鏡の支持に耐えうるかの強度試験 (Fiber, HCB)
 - ◆熱雑音推定のためのmechanical loss測定 (Fiber, Indium bonding, HCB)
 - ◆低温鏡のための熱抵抗測定 (Fiber, Indium bonding, HCB)
- ★まとめ

重力波及び地上望遠鏡のターゲット

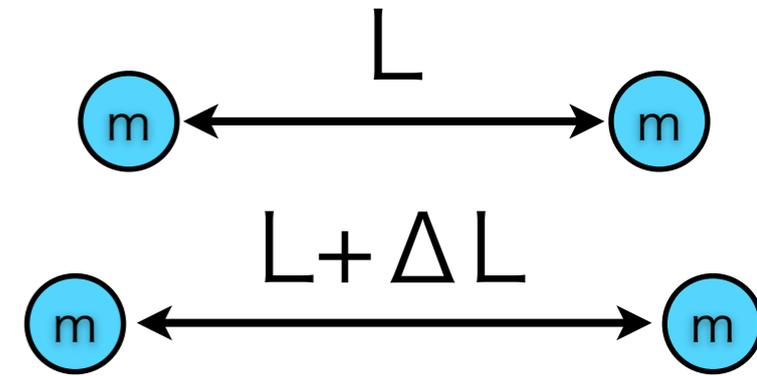
★一般相対性理論によって予言されている重力の波動現象

◆物体の加速度運動で放出

◆間接的には存在が証明されている

• 連星パルサーPSR B1913+16の公転周期減少が計算と一致

◆直接的には観測されていない



$$\text{Strain: } h = \frac{\Delta L}{L}$$

★重力波の性質

◆自由質点間の固有距離を変動させる

◆偏波が2つ

◆光速で伝播

◆影響が小さい

観測される振幅の予想 $h \simeq 10^{-23}$

中性子星連星合体の場合(200Mpc)

➡ 精密で、雑音の少ない観測が必要

★地上望遠鏡の主なターゲット

◆連星中性子星合体 (10Hz~1kHz, 200Mpc内で年に数回)

◆連星ブラックホール合体 (10Hz-100Hz, 200Mpc内で年に10回程度)

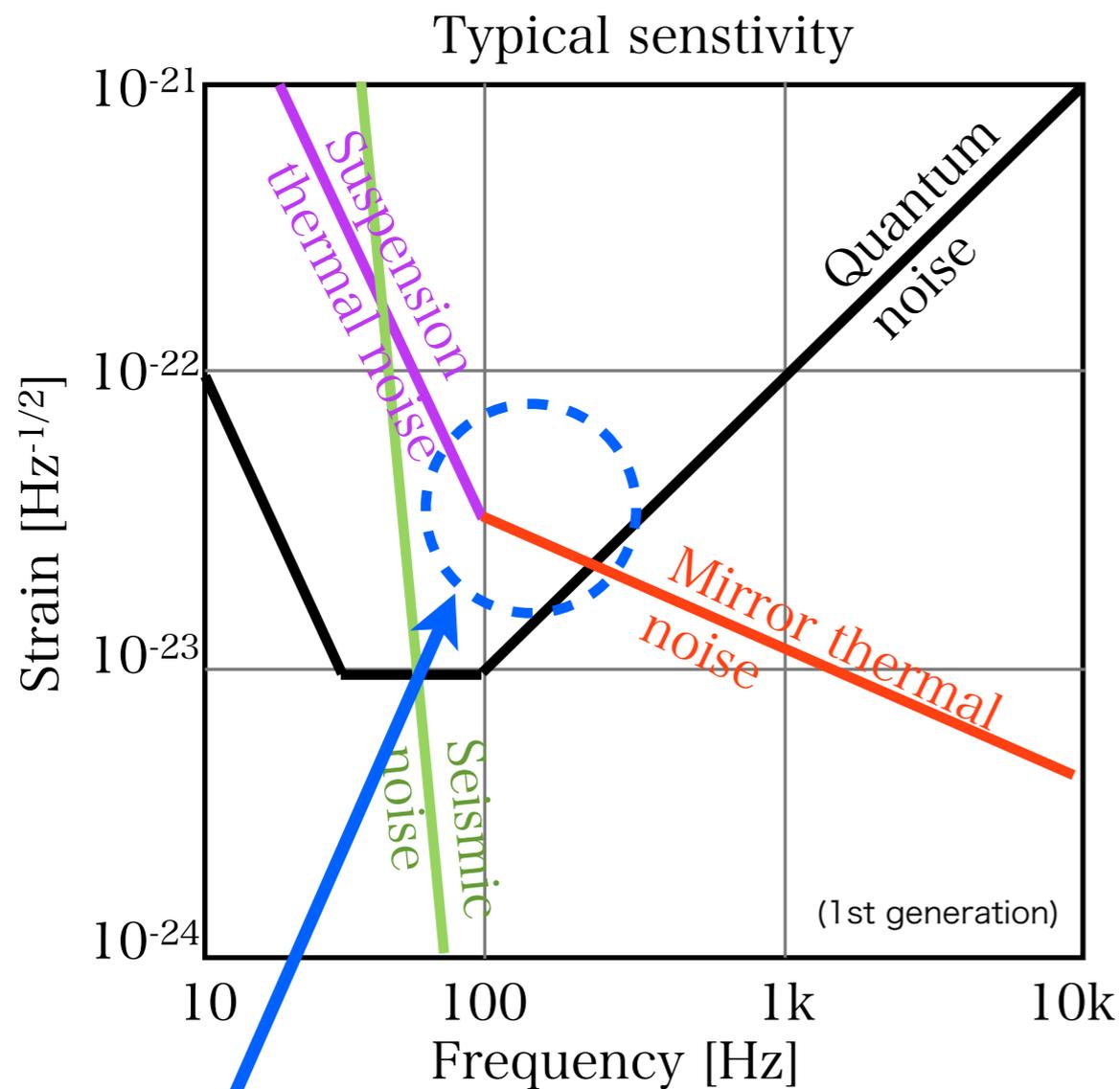
◆パルサー(1Hz-1kHz)、超新星爆発(<1kHz)

↑ KAGRAのメインターゲット

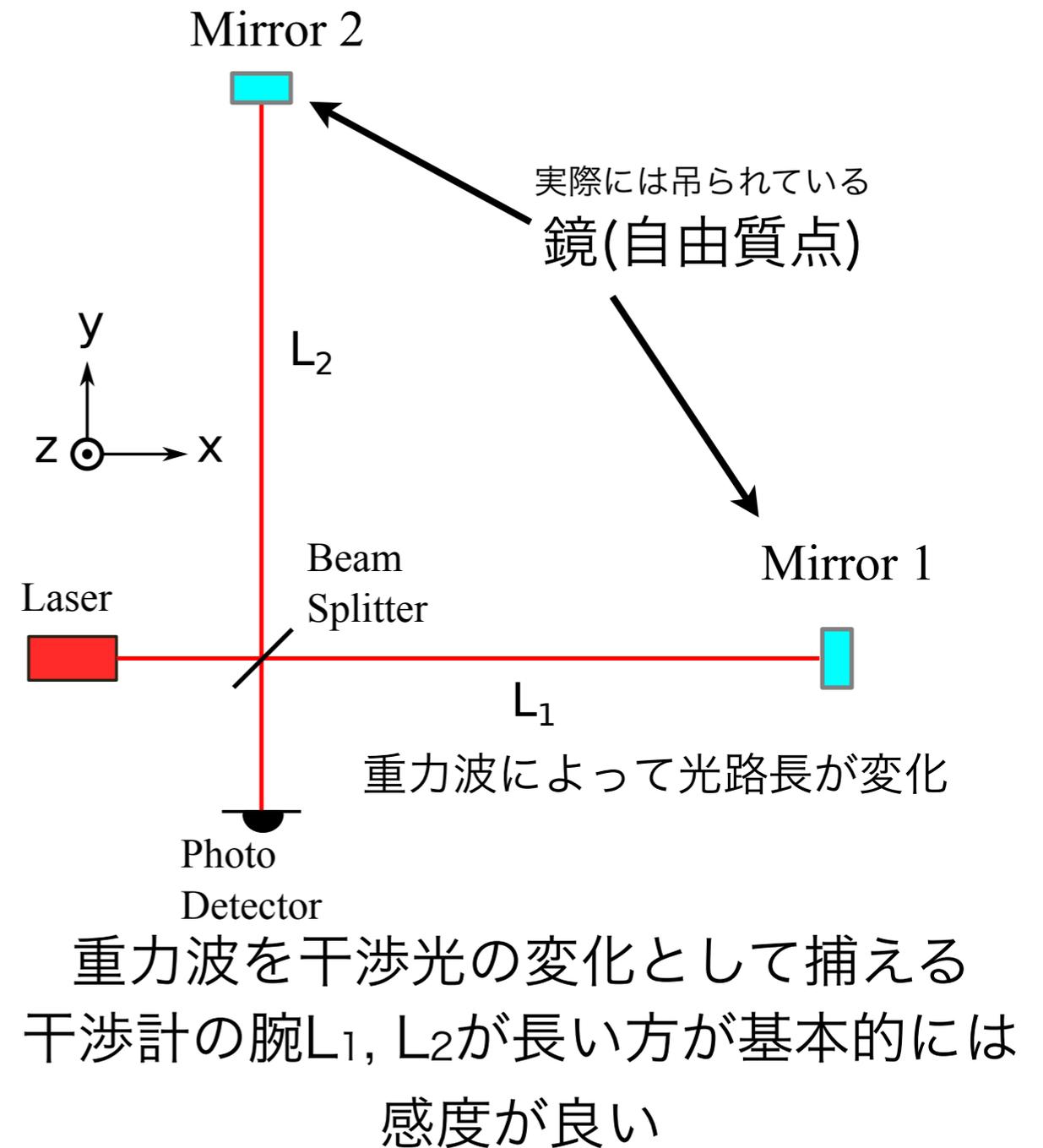
重力波望遠鏡-レーザー干渉計-

★検出原理

- ◆重力波によりL1, L2の光路差が変化
- ◆差動変化を干渉縞の変化として検出



熱雑音が問題 -> 低温鏡を使用しての観測



建設中

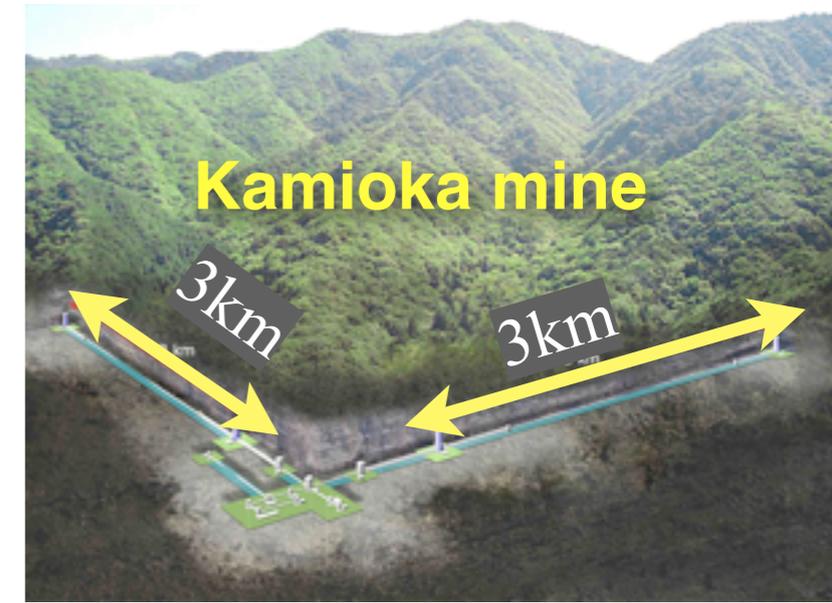
将来計画

KAGRA, Einstein Telescope(ET)

大型低温重力波望遠鏡KAGRA

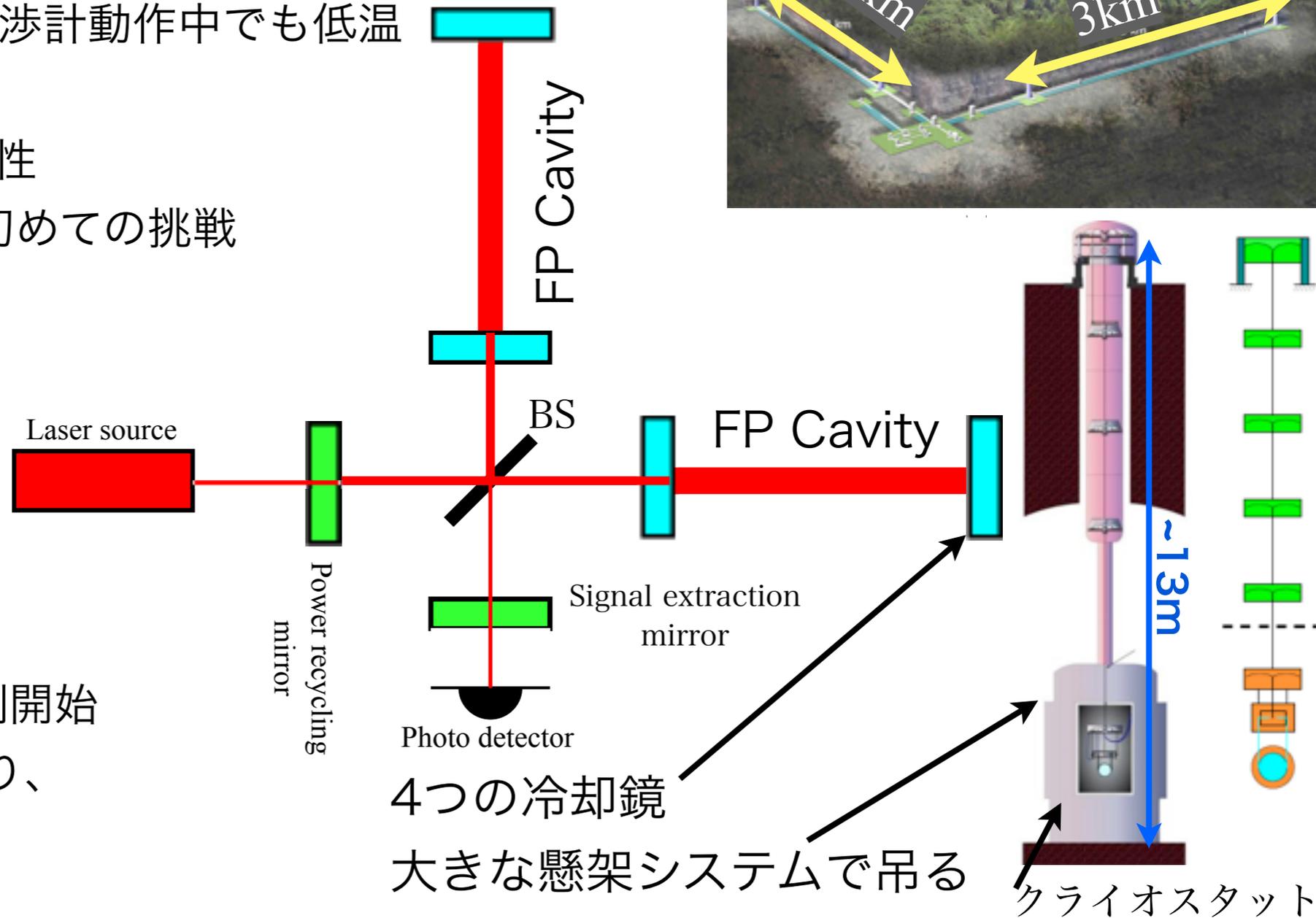
★特徴

- ◆地面振動の少ない地下に建設
- ◆熱雑音を抑えるために低温鏡(20K)を使用
 - 高出力レーザーによる干渉計動作中でも低温をキープ
 - 熱サイクルに対する耐久性
- km級の干渉計望遠鏡では初めての挑戦
 - プロトタイプではCLIO
- 次世代の望遠鏡(例:ET)で必須の技術



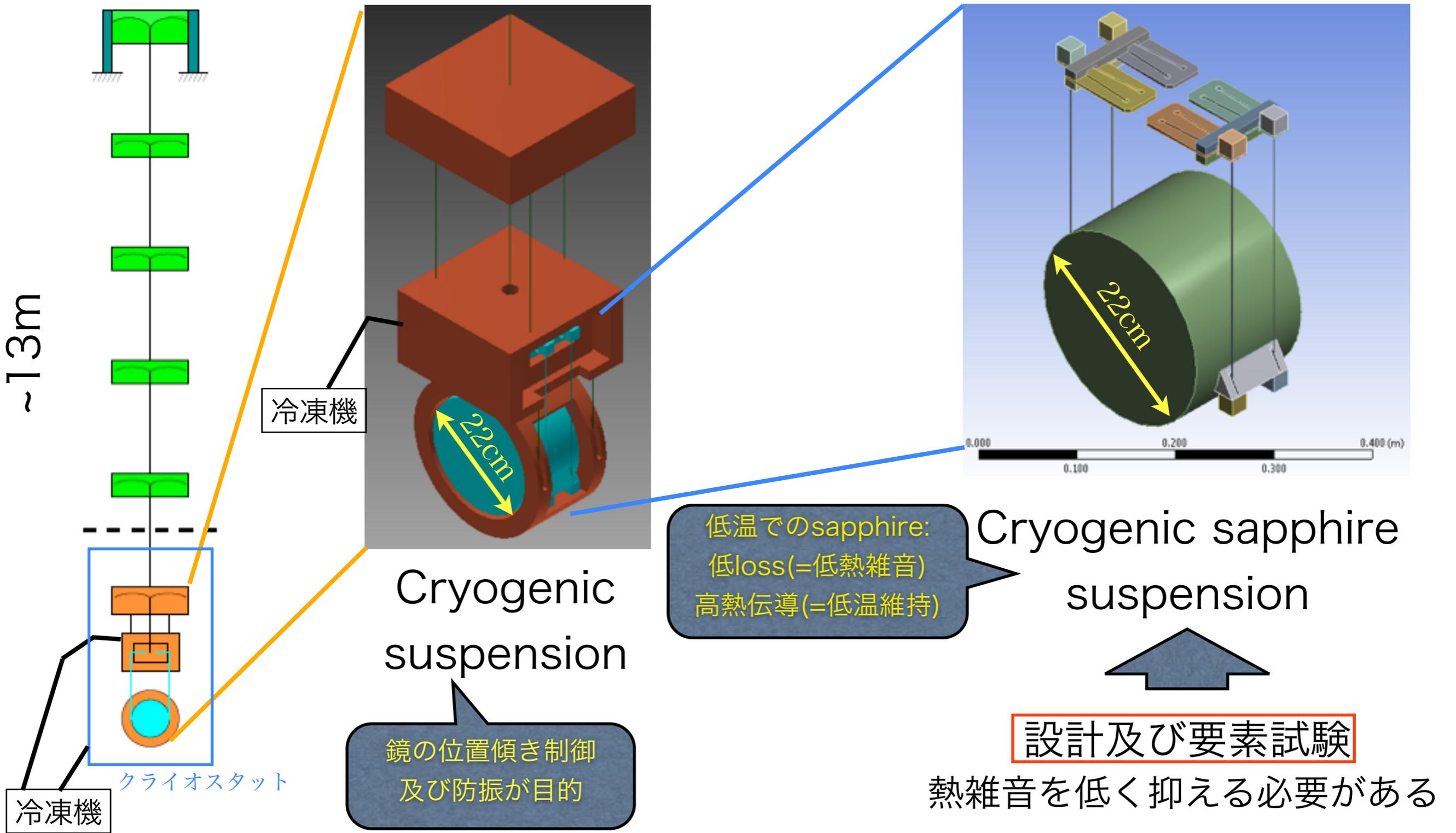
★計画

- ◆2015年末に試験運転
- ◆2017年末に冷却鏡での観測開始
- ◆現在はトンネルが掘り終わり、機器のインストール中



低温鏡は最も重要な技術。事前の技術実証が必要。

本研究の位置づけ



KAGRAになくってはならない研究

Cryogenic suspensionの概要

- Sapphire suspension -
Sapphire鏡を低温、低熱雑音で支持する

★Hydroxide Catalysis Bonding (HCB) 60nm

- ◆鏡を支える化学的で強力な接着(Na_2SiO_3)
- ◆衛星中の光学部品の接着にも使用されている(e.g. Gravity Probe B)
- ◆高温高圧が不要

★Ear

★Indium Bonding (InB) 1 μm

- ◆FiberやBladeが破損したときには取り外し可能

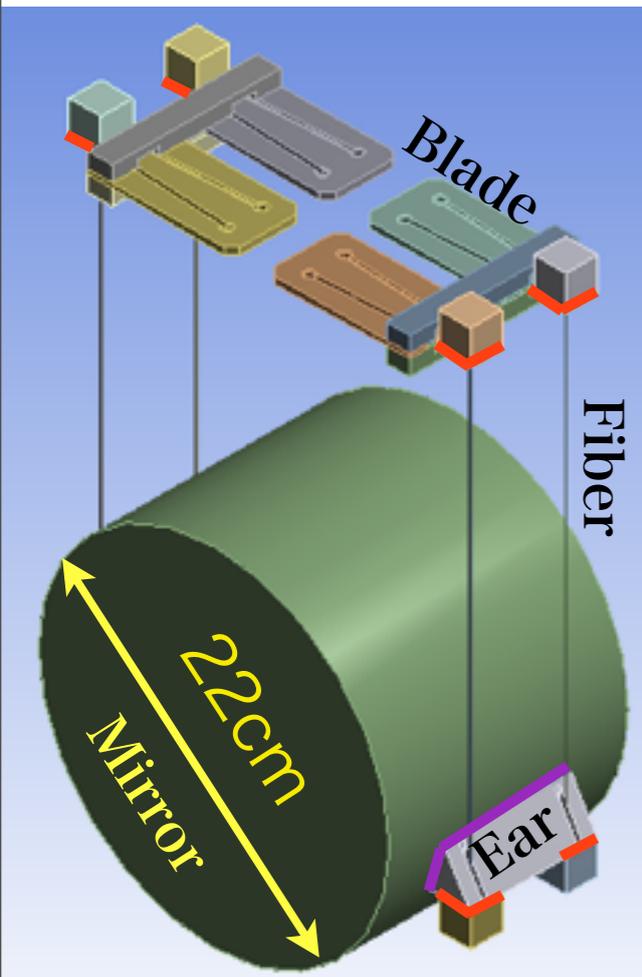
★Fiber ϕ 1.6mm, L300mm

- ◆両端にヘッドが溶接されている(Alumina brazing)
- ◆鏡を支える
- ◆レーザーから吸収した熱を外に逃がす

★Blade(設計等は本論文の範囲外)

- ◆ファイバー長の製作誤差をキャンセル

参照: http://www.gravity.ircs.titech.ac.jp/GWADW2014/slide/Rahul_Kumar.pdf



- Indium bonding
- Hydroxide catalysis bonding



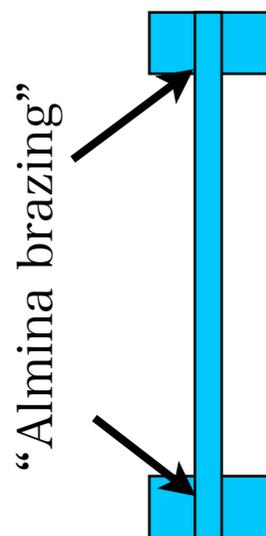
HCBで接着された
サファイヤサンプル



Indium



試験用の短いfiber
(Impex社製作)



Blade(信光社製作)

Cryogenic suspensionの概要

本研究で行ったこと

(ELiTESによる協力)

★ Cryogenic sapphire suspension

◆ 設計

◆ 強度試験(鏡を安全に吊れるか)

- (Fiber←共同研究者による試験)

- HCB

◆ Mechanical Loss測定(熱雑音が十分低いか)

- Fiber

- Indium bonding

- HCB

◆ 熱抵抗測定(干渉計稼働時に鏡は20Kか)

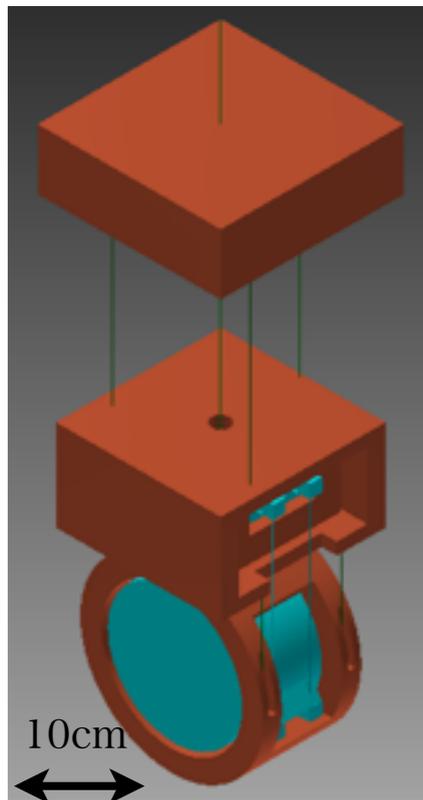
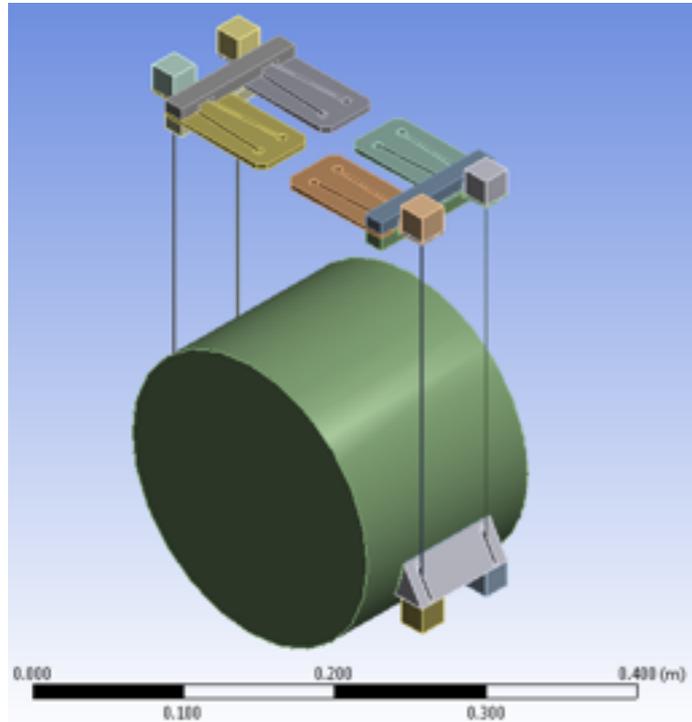
- Fiber

- Indium bonding

- HCB

★ 冷却系起源の振動推定(影響は十分低いか)

これら全てが要求値を満たさなければKAGRAは稼働しない、
もしくは目標感度を達成できない。

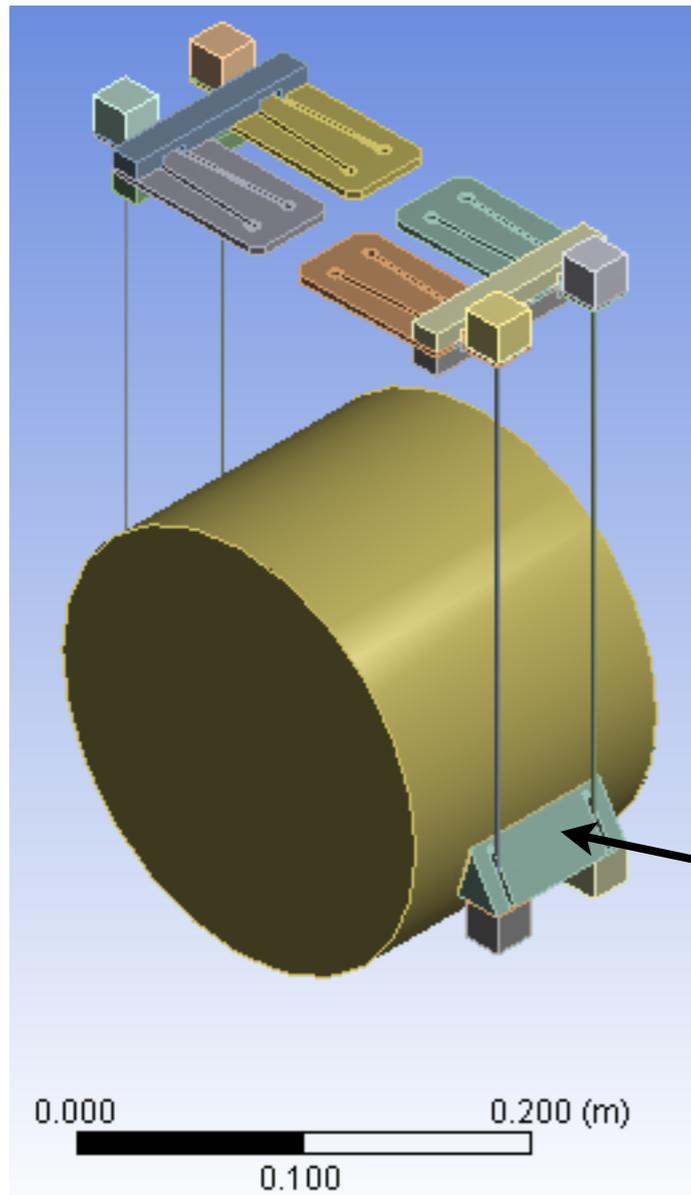


Sapphire suspension

-設計-

Cryogenic sapphire suspensionの設計:

- 熱雑音低減のために各点におけるエネルギー密度を極力小さく
- 傾き、並進運動のカップリングを少なく
- Fiberの振動周波数が予想される重力波源と重ならないように
- 干渉計稼働中でも鏡が20Kを保てるようになど



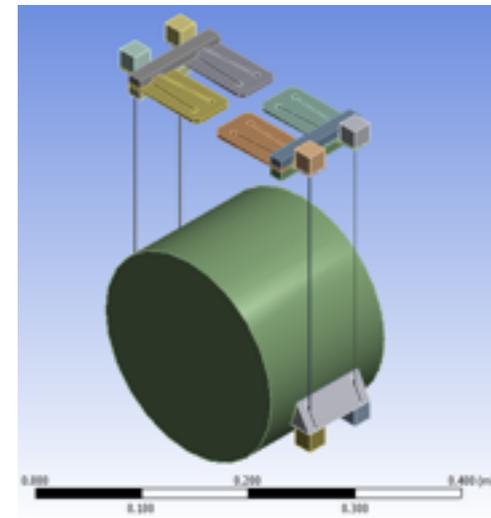
Cryogenic sapphire suspension

工夫した点の例:

接着部のエネルギー密度が小さくなるようにearの質量を小さくした。
このためにearを斜め下から接着し、形も三角柱にした。

Sapphire suspensionの要求値

-強度-



Fiber:

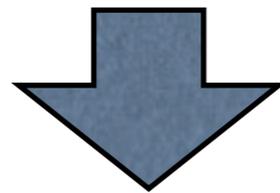
1本に実際かかる荷重: 5.7kg

強度試験(GlasgowとRomeチーム)

実際より短い10cm fiberで試験



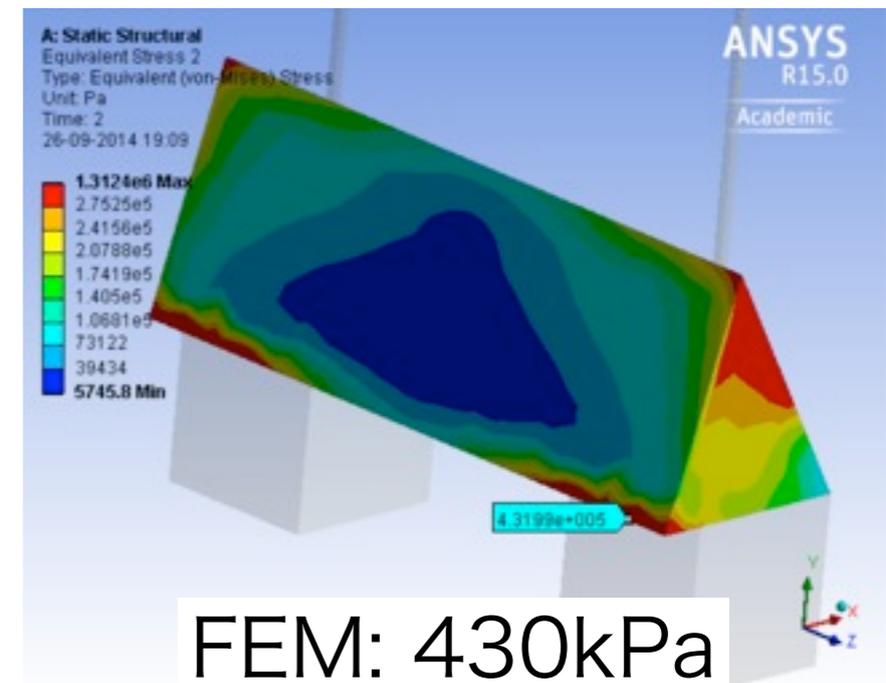
荷重:15kg
振幅:5-7mm



破損せずに
耐えられた

HCB:

接着面に加わるストレス

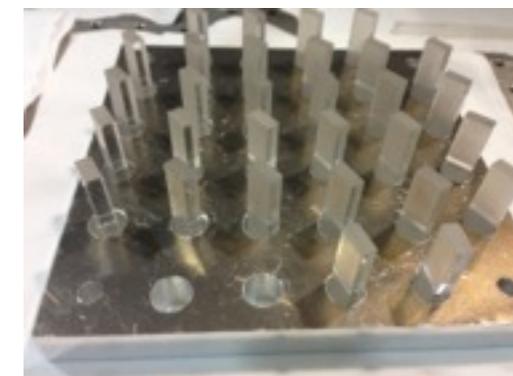
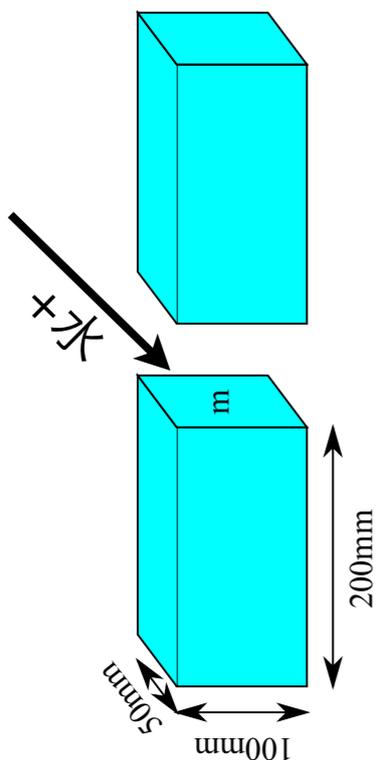


HCBに対する要求値: 1MPa

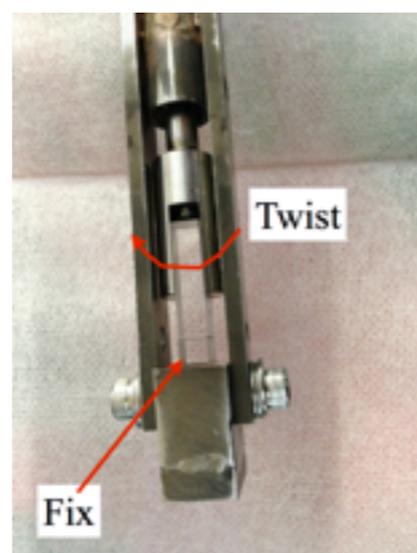
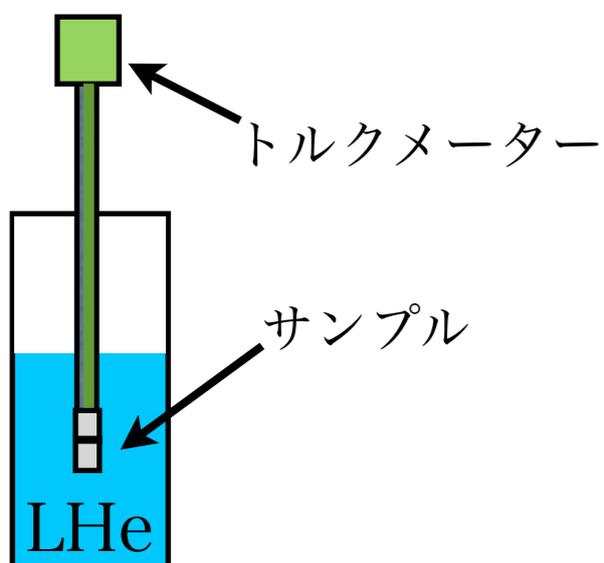
強度試験

- HCBサンプル、実験装置 -

接着サンプルを作り、熱サイクルを経験させた後に低温で強度試験を行った。



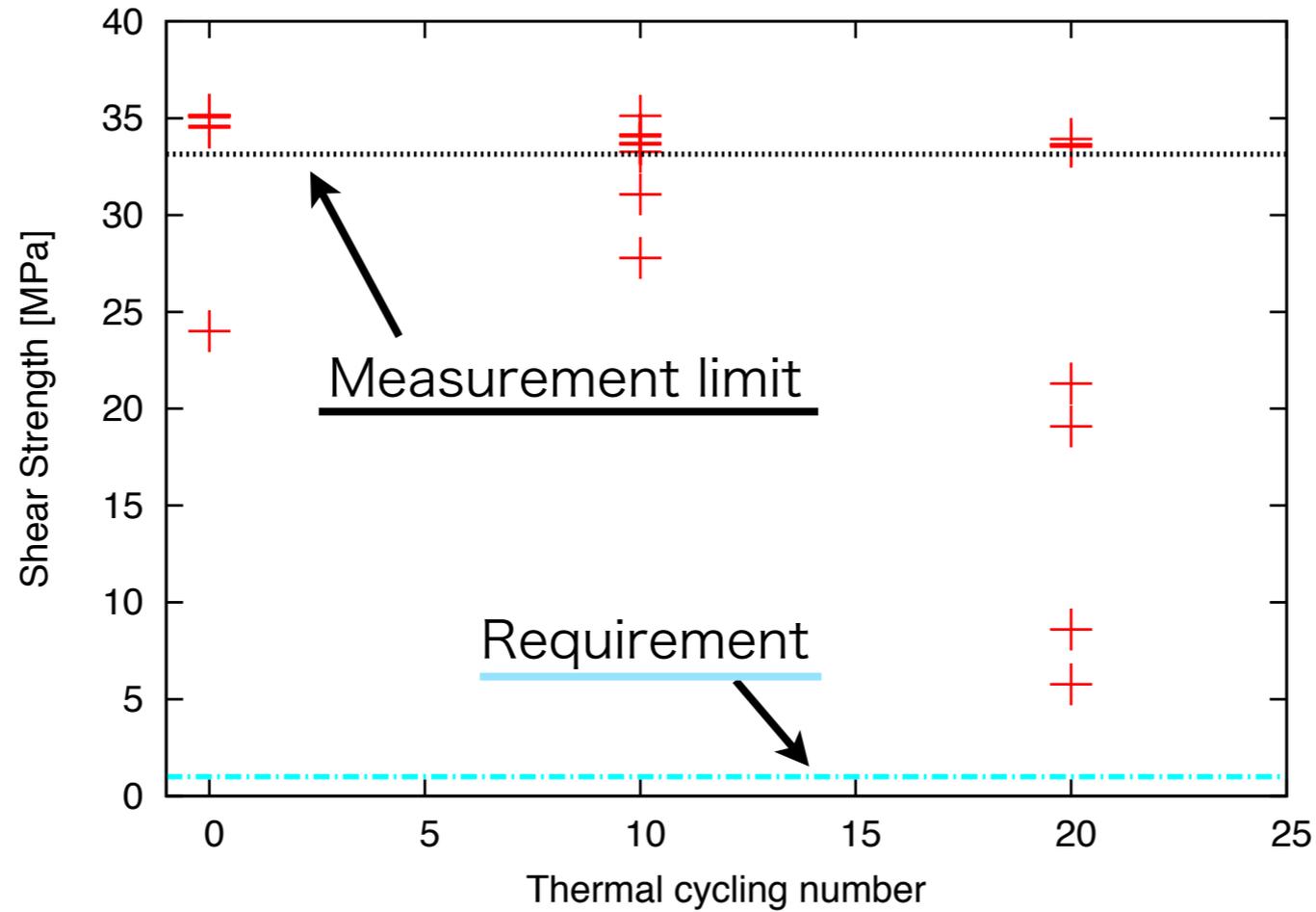
熱サイクル数 (室温 \rightleftharpoons 20K)	サンプル数 (200°Cでの経験なし)
0	7 sets
10	8 sets
20	8 sets



片側を固定し、もう片側をひねる。
破壊したときのトルクを測定。
測定限界: 33MPa (剪断応力換算)

強度試験

- HCB 試験結果 -



熱サイクルによる強度の変化は見たものの、
全てのサンプルが要求値以上の強度を持つ

Sapphire suspensionの要求値

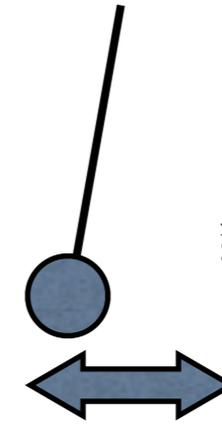
-熱雑音とは-

揺動散逸定理 ← 散逸 ϕ と揺動 x の関係

$$x^2(\omega) = \frac{4k_B T}{\omega^2} \text{Re}[Y(\omega)]$$

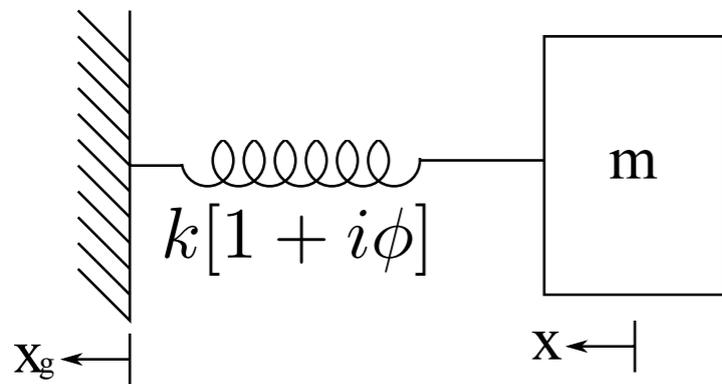
系の力学的 admittance

Mechanical loss ϕ に依存

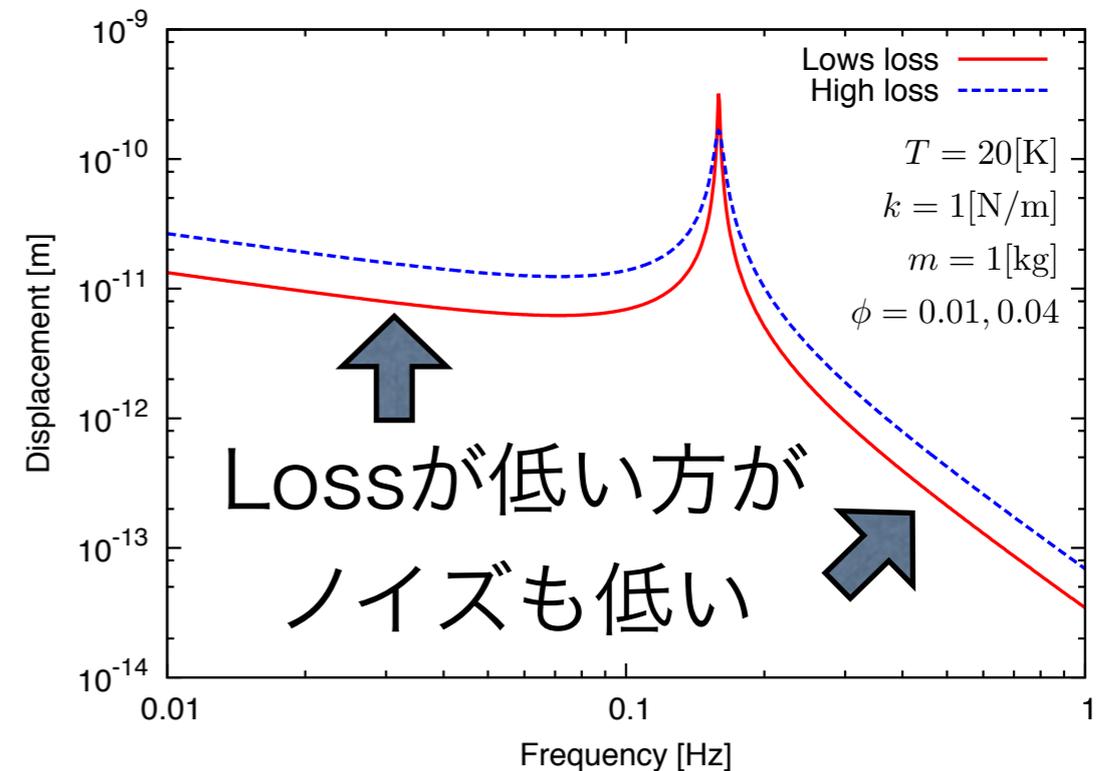


熱エネルギーにより揺れる

例



$$x^2(\omega) = \frac{4k_B T k \phi}{\omega [(k - m\omega^2)^2 + k^2 \phi^2]}$$



もっと複雑な系ではどうする？

Sapphire suspensionの要求値

-熱雑音-

Levinの方法を使用し、熱雑音を計算

熱雑音:

Yu. Levin PRD (1998) 57 659

$$x^2(f) = \frac{2k_B T}{\pi^2 f^2} \frac{W_{diss}}{F_0^2}$$

$$W_{diss} = 2\pi f \int u(\vec{r}) \phi(\vec{r}) dV$$

Mechanical loss:

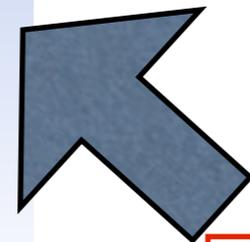
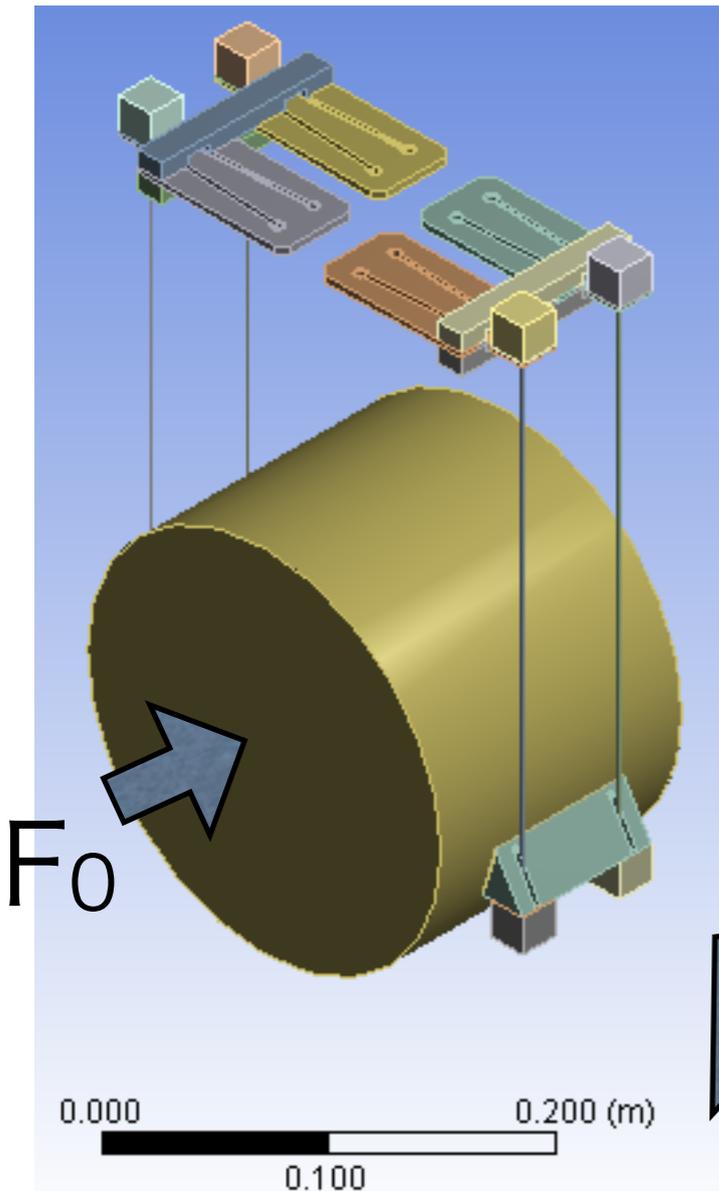
各パーツ固有の値。測定が必要。

各点における弾性エネルギー密度 ← FEM

エネルギー密度が小さくなるように設計

各パーツが干渉計に与える熱雑音の影響を調べることができる。

各パーツにMechanical lossの要求値を与える。

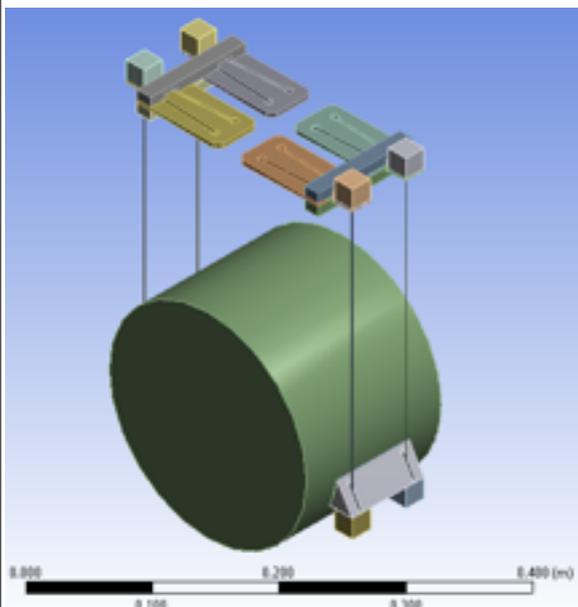
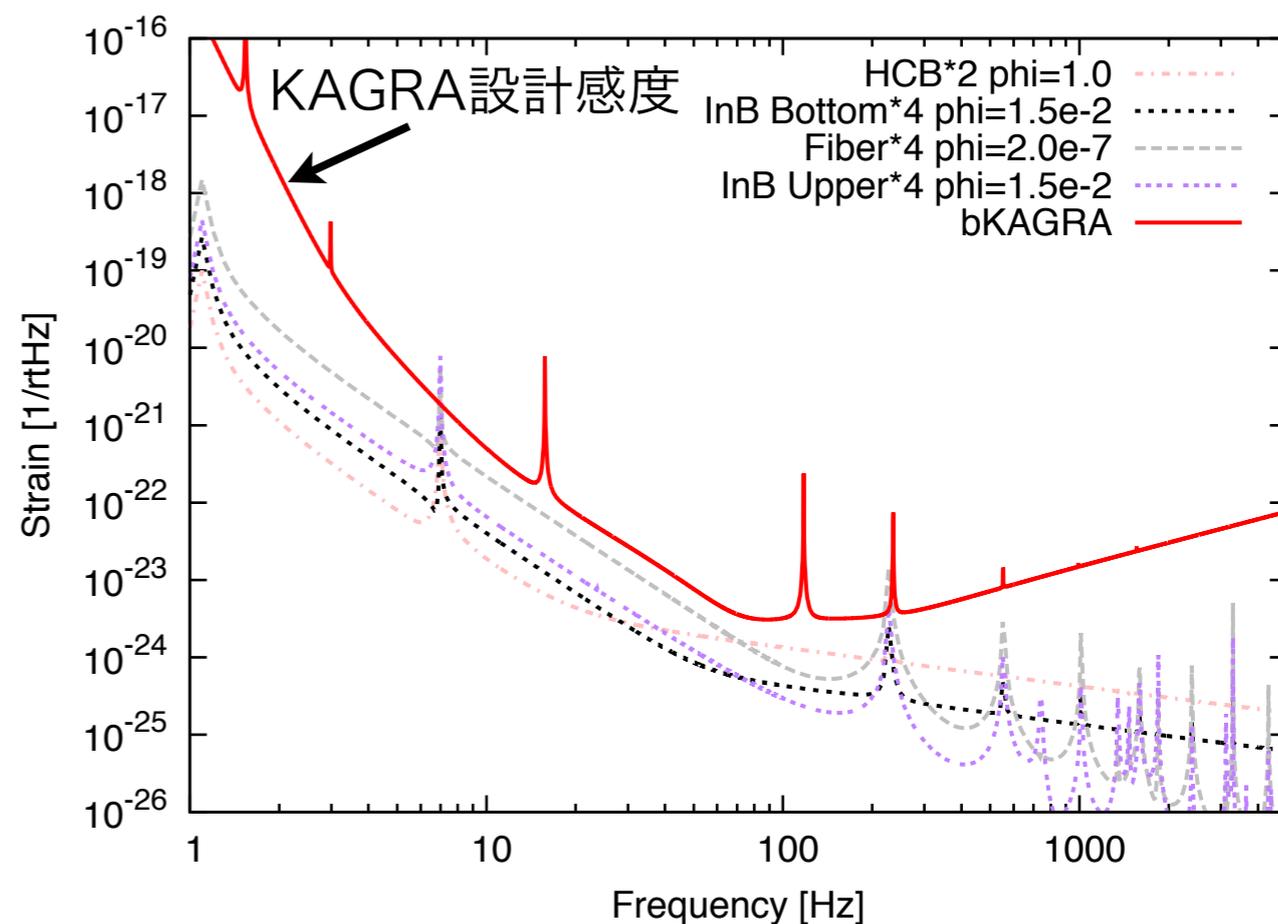
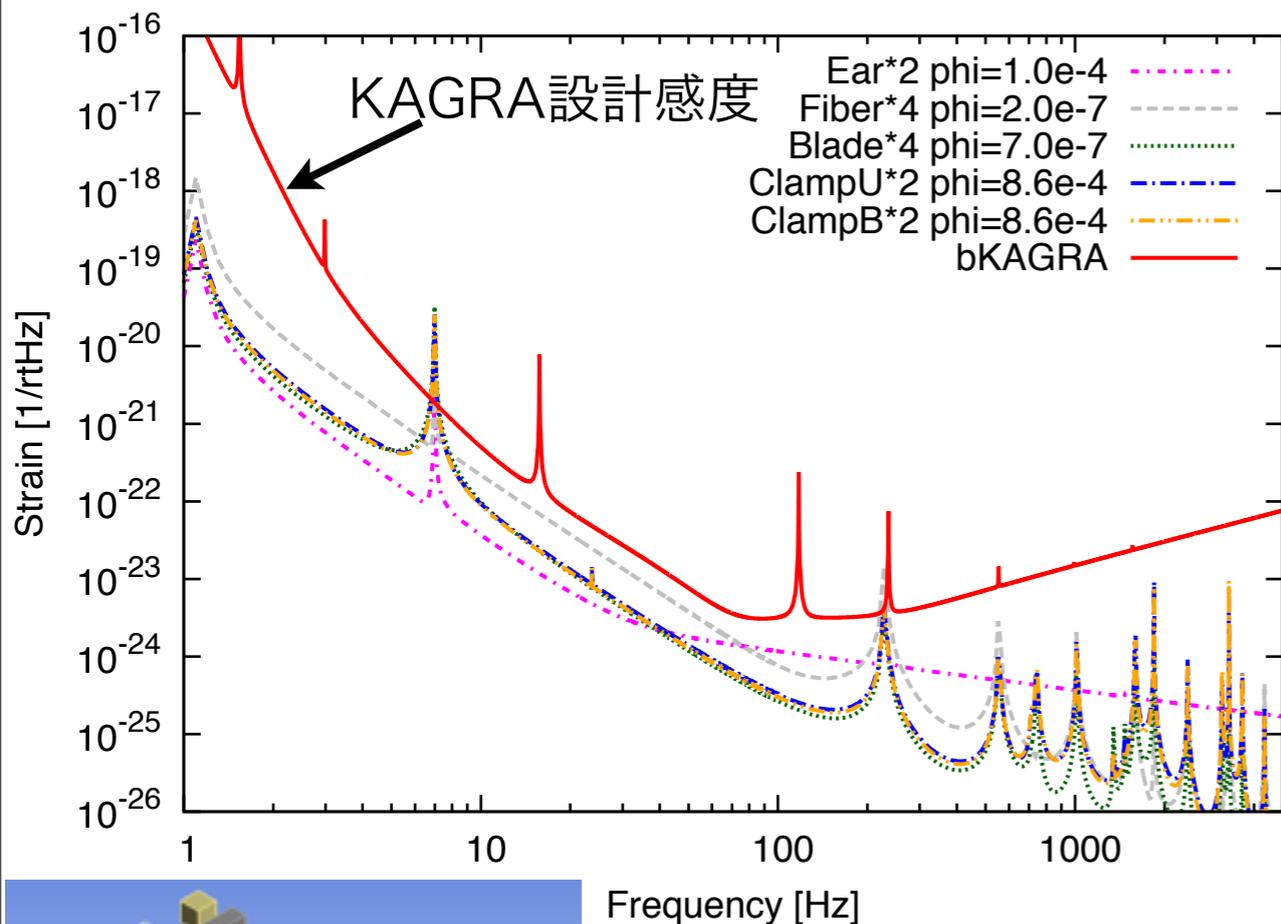


Sapphire suspensionの要求値

-熱雑音-

各パーツ起源の熱雑音がKAGRA設計感度の1/2になるようにMechanical lossの要求値を設定

ただし低周波ではFiberが要求値に近い値をもつと予想されていたので、他のパーツはFiberの1/3になるよう要求値を設定した。パーツ数(種類)が10個程度であるため、足し合わせてもfiberによる雑音に届かないように。



Frequency [Hz]

Frequency [Hz]

Component	Req of loss
Fiber	2.0×10^{-7}
Indium bonding ($1 \mu\text{m}$)	1.5×10^{-2}
HCB (60nm)	1.0

他のSapphire部分は問題なく要求値を満たせると思われる。(一般的にSapphireバルクのLossは低温で 4×10^{-9} ほど)

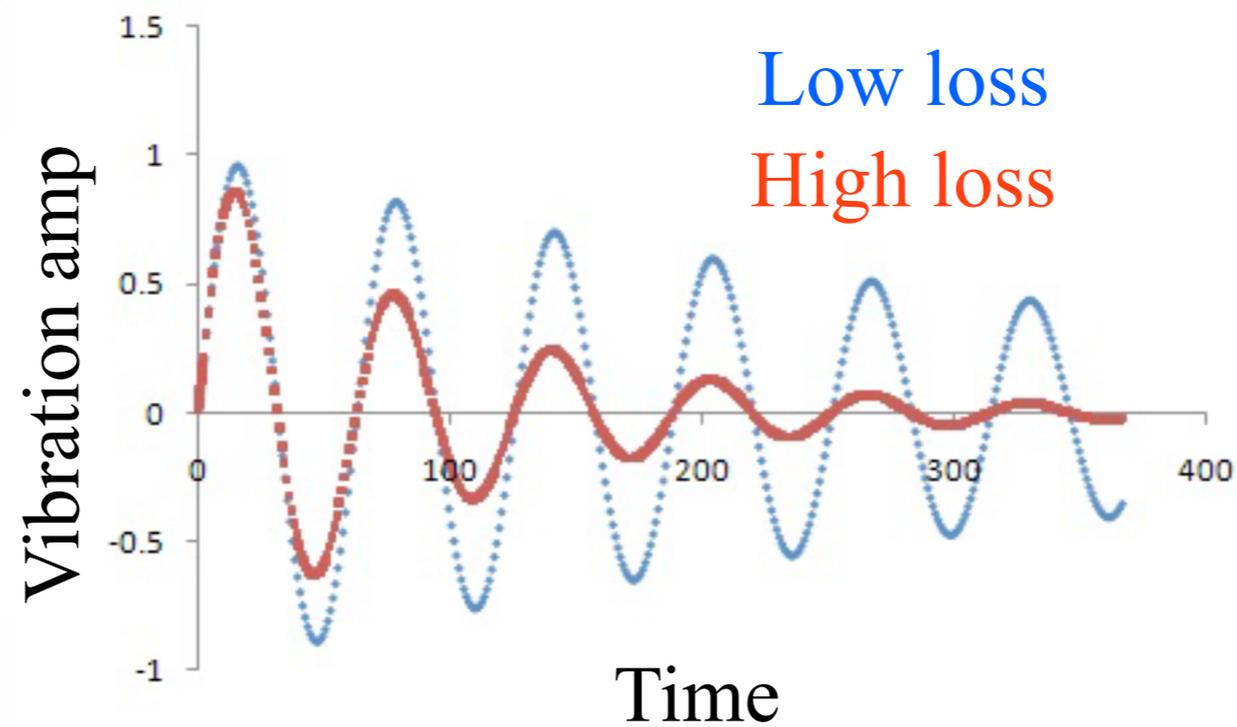
Mechanical lossの測定

- 測定原理 -

減衰曲線の測定

Mechanical loss

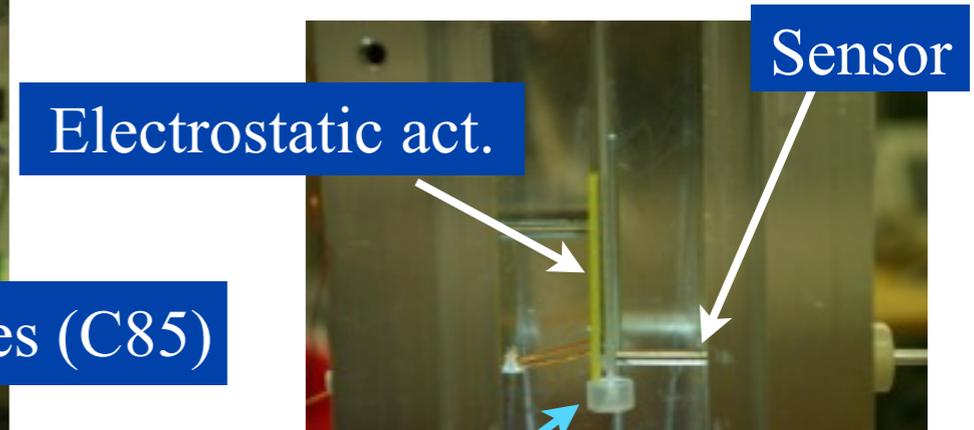
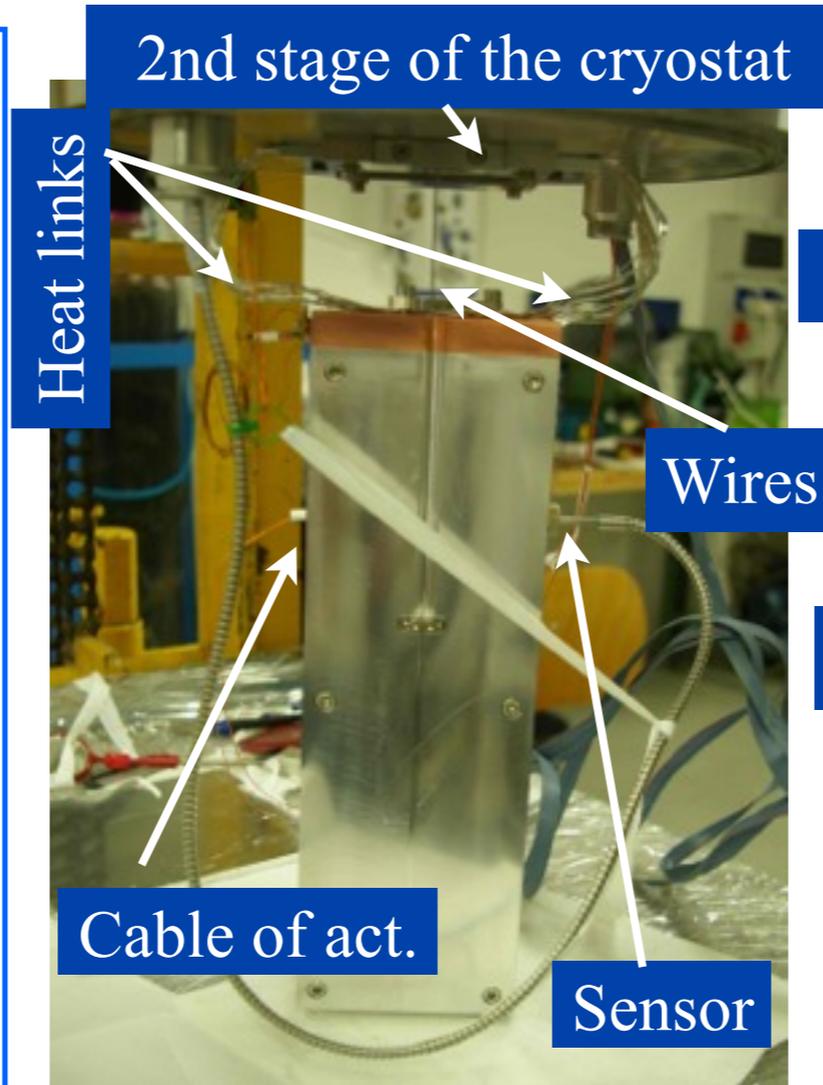
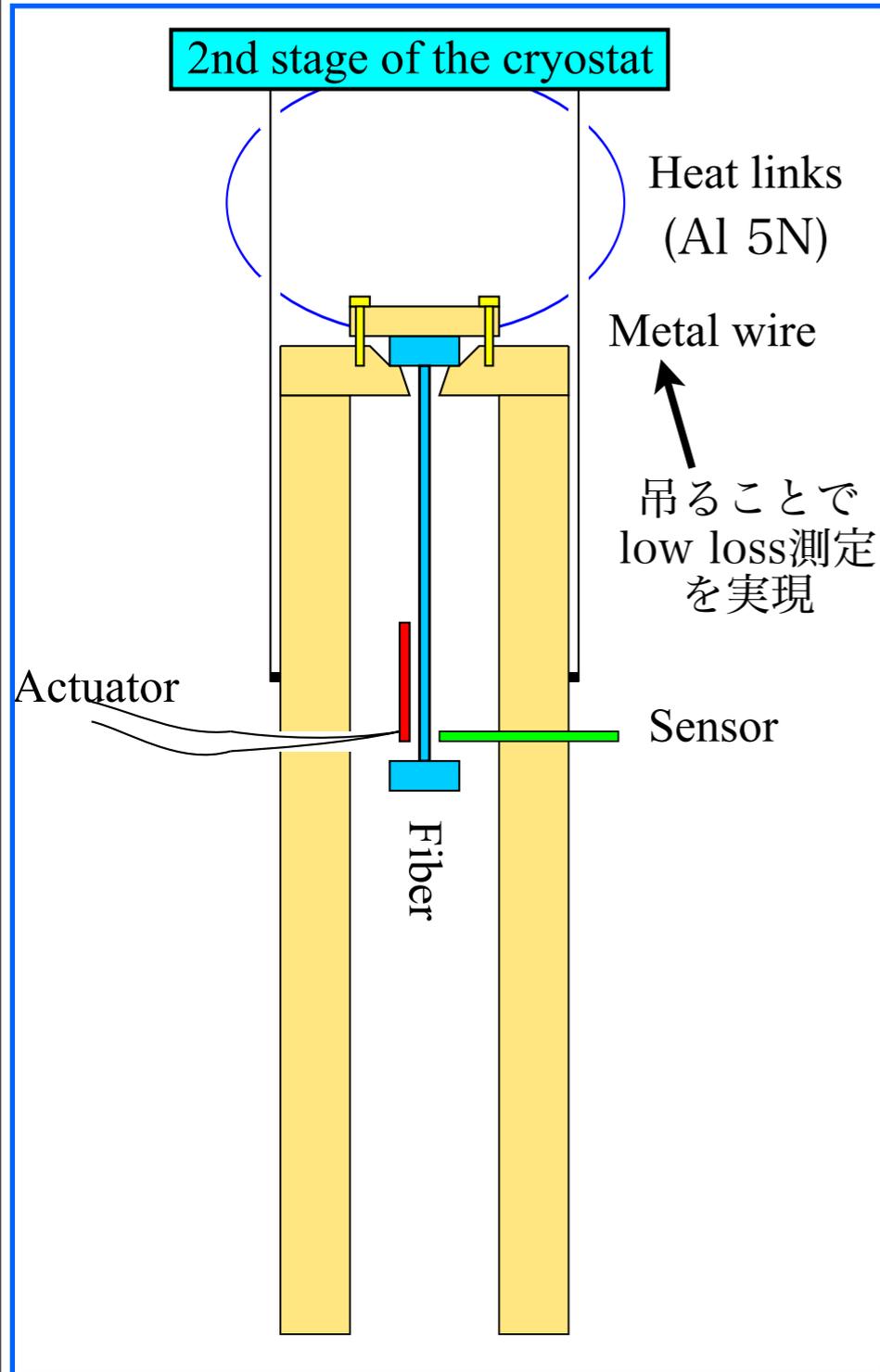
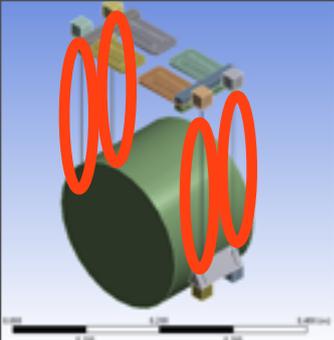
$$f(t) = A \sin(2\pi f_0 t) e^{-\pi f_0 \phi t}$$



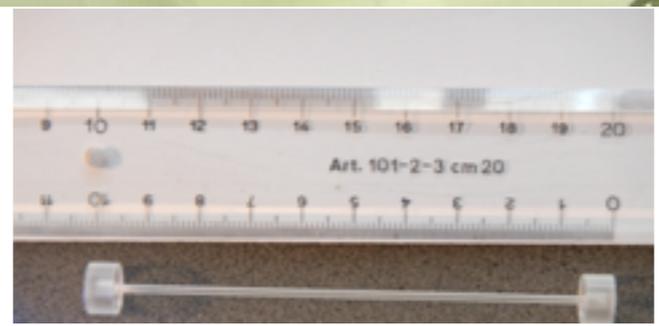
Mechanical lossの測定

@Rome

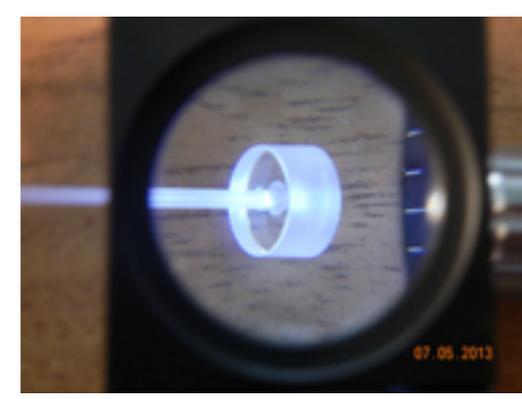
- Fiberの測定装置 -



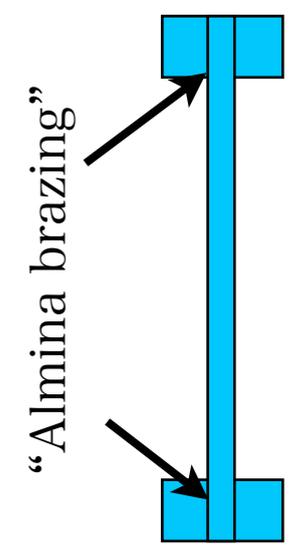
静電アクチュエータで振動させ、その減衰を測定



~10cm
Fiber samples



Non-monolithic Thermo-polish HEM quality

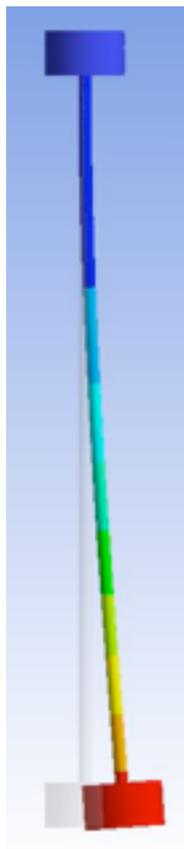


Cryostat
(サンプルの最低温度: ~15K)

Mechanical lossの測定

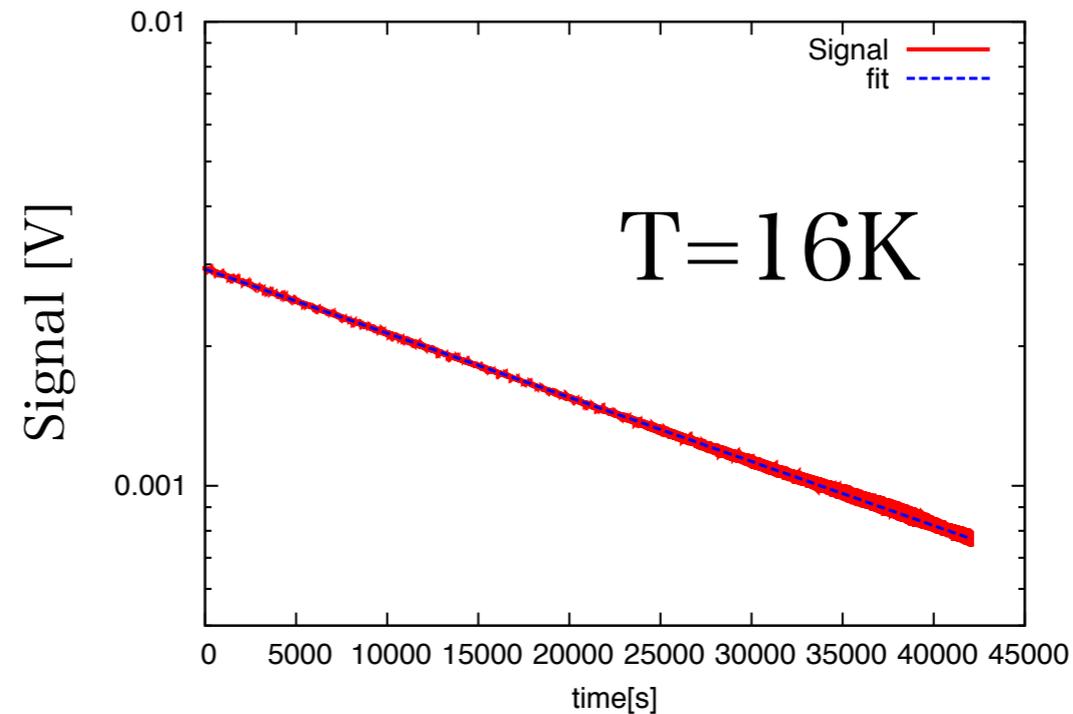
- Fiberの測定結果 -

測定した
メインのモード



~90Hz

減衰曲線の一例

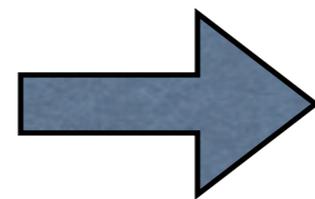


Fittingの結果

$$f(t) = \alpha e^{-\pi f_0 \phi t}$$

$$\phi_{req} = 2.0 \times 10^{-7}$$

要求値よりlossが小さい



$$\phi = 1.1 \times 10^{-7} \quad (T=16K)$$

(誤差は10%程度)

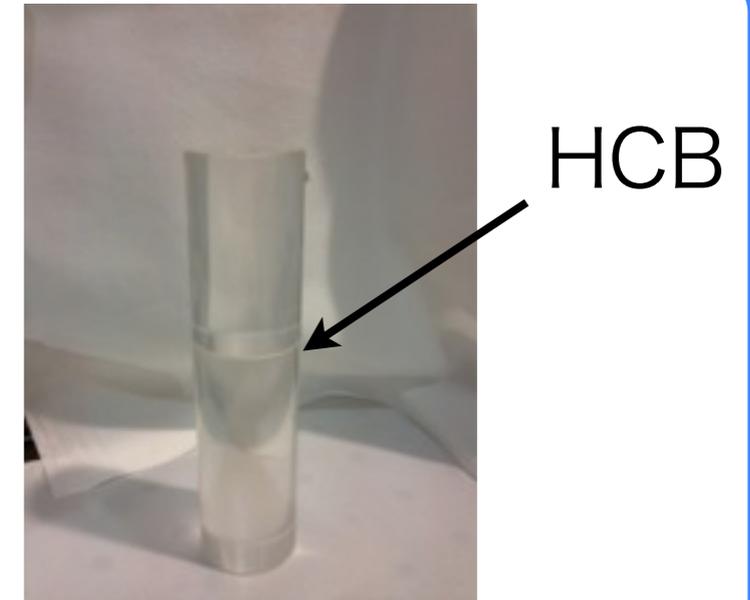
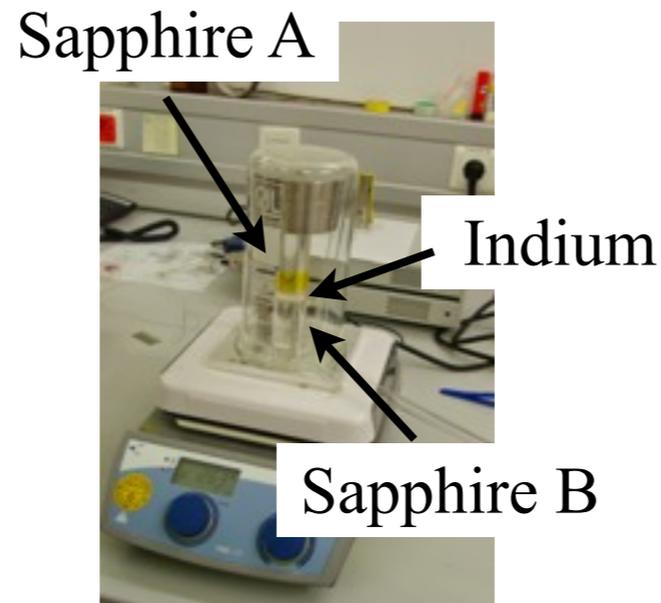
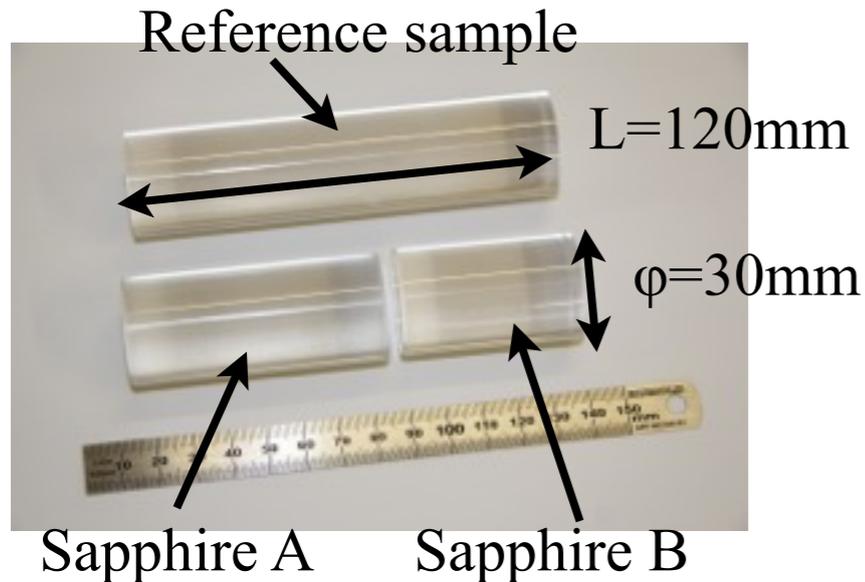
要求値を満たすFiberを作成可能

Mechanical lossの測定

@Jena

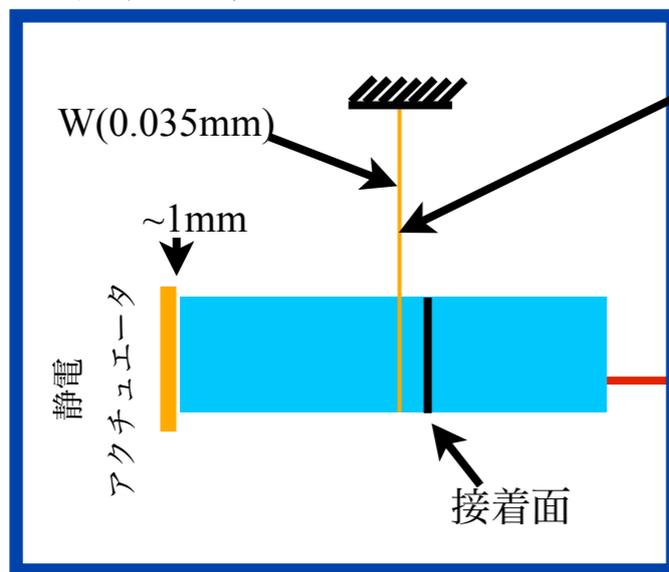
- Bondingの測定装置 -

サンプルの接着



測定装置

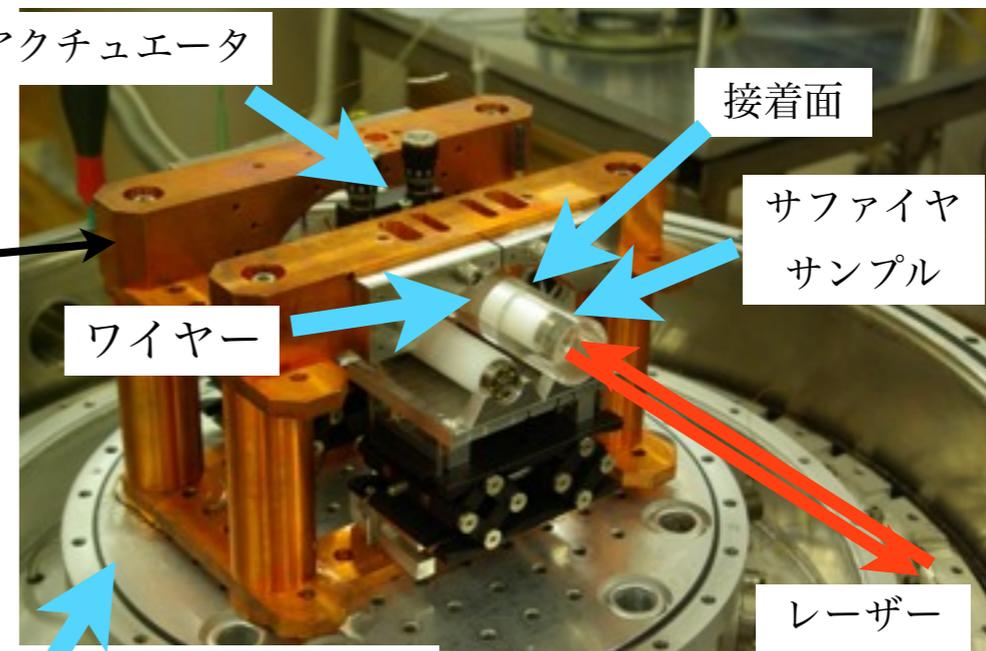
クライオスタット



工夫点:

細いワイヤー
頑丈な支え

静電アクチュエータ



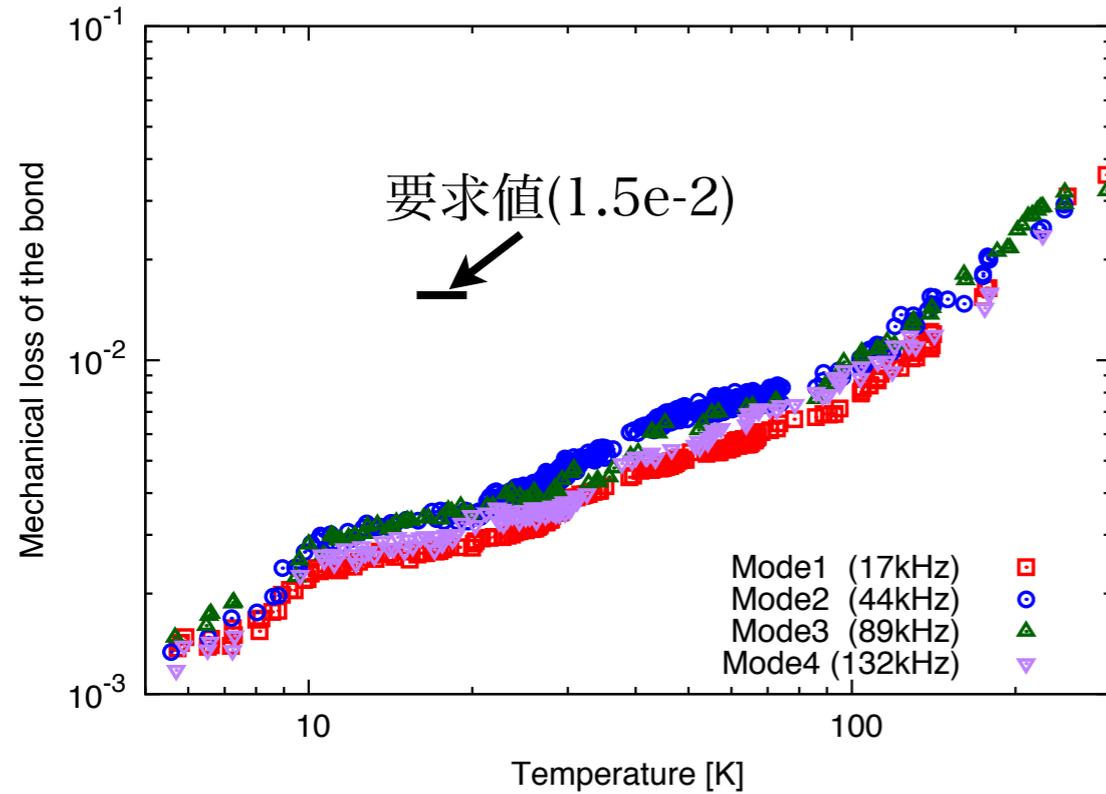
クライオスタットの冷却ステージ

Bondingのlossを知るためにはreferenceとの比較が必要

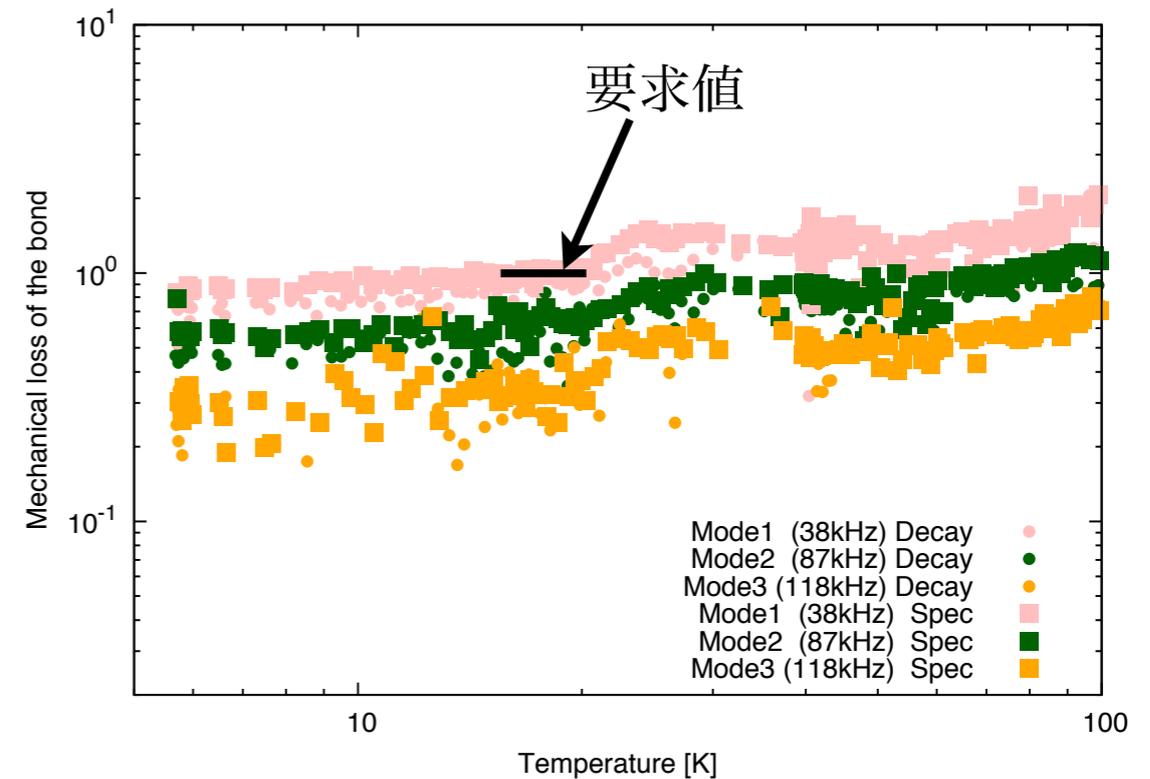
Mechanical lossの測定

- Bondingの測定結果 -

Indium bonding



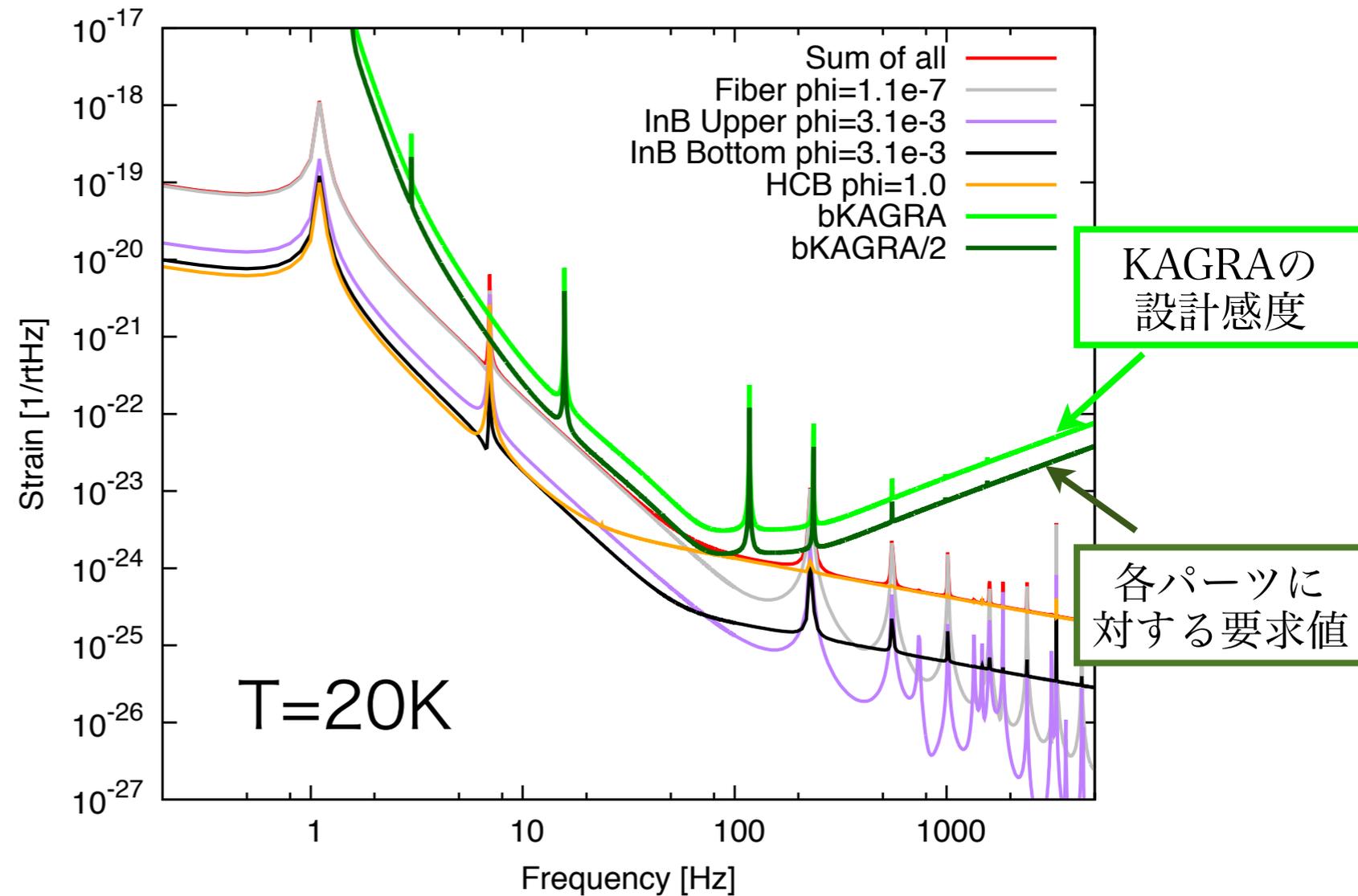
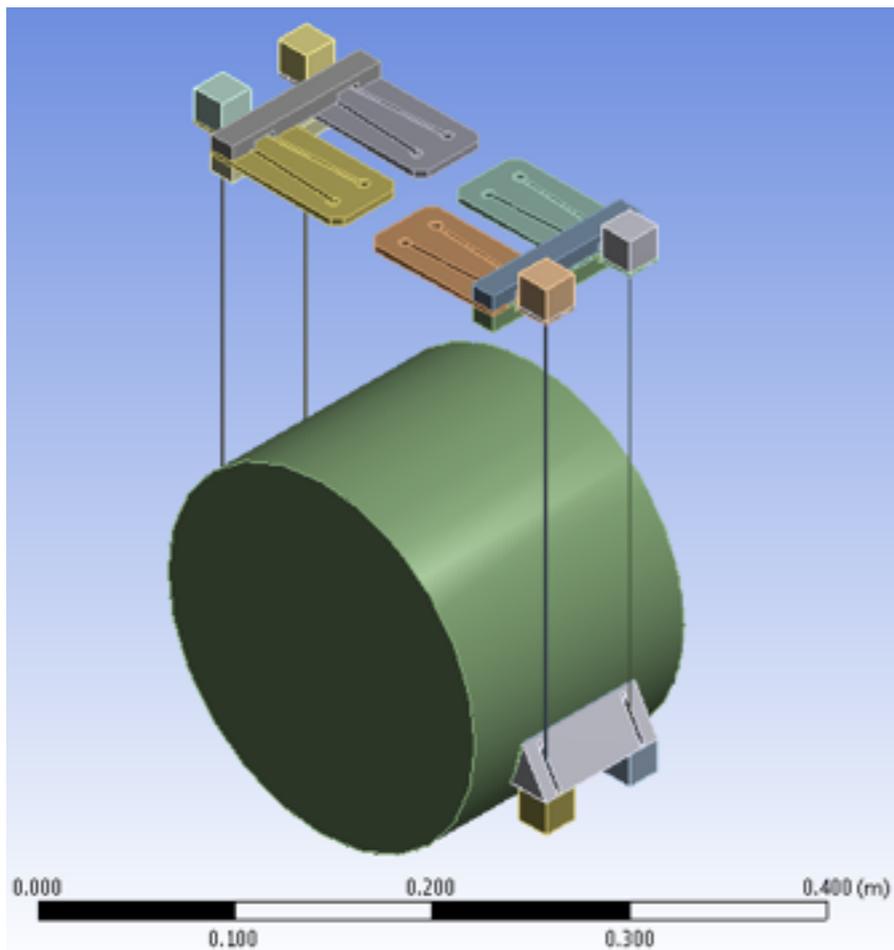
HCB



Indium bonding及びHCBのmechanical lossは
要求値よりも小さい

熱雑音

測定値を入れたsuspension熱雑音

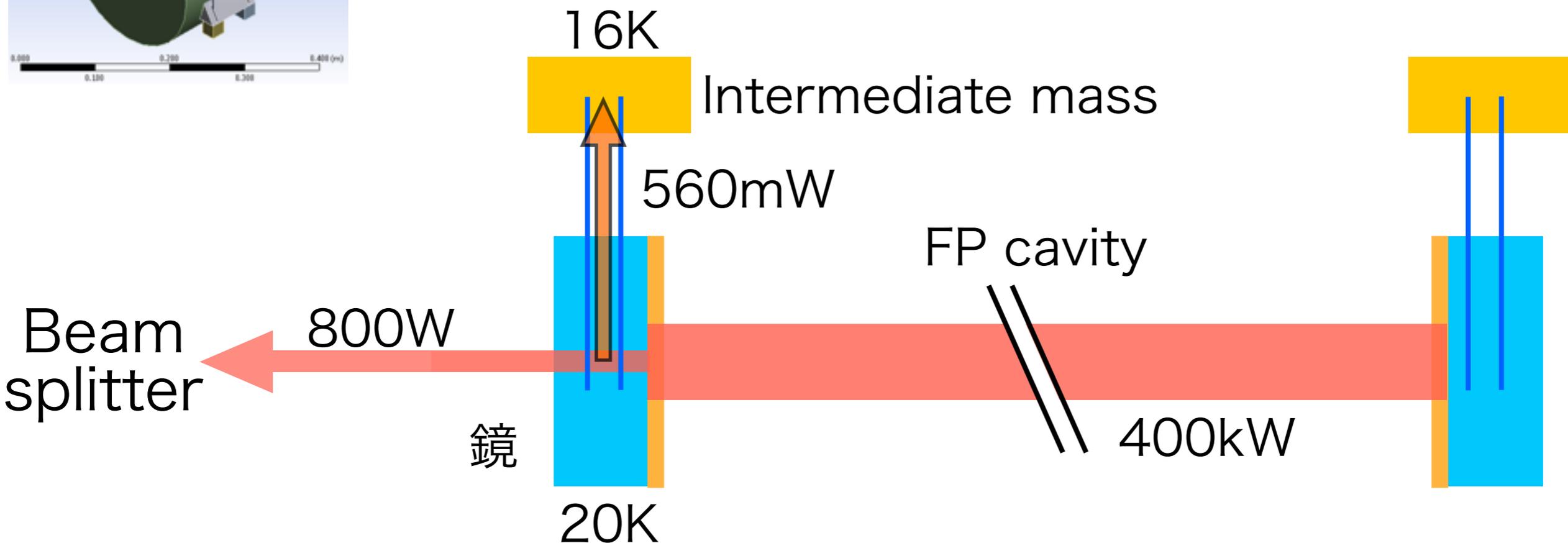
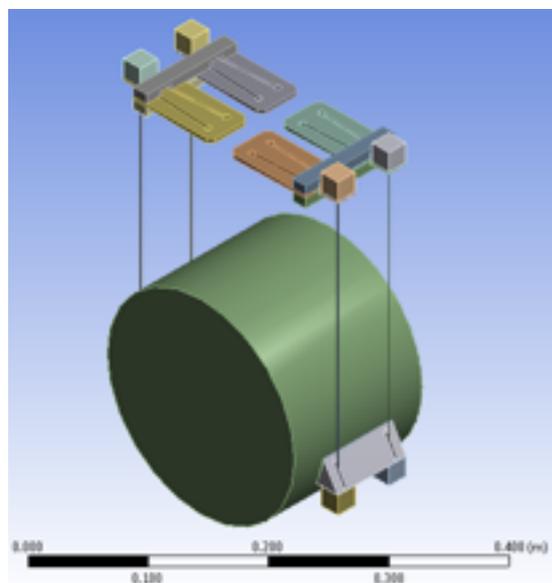


熱雑音はKAGRAの設計感度以下

Sapphire suspensionの要求値

-熱伝導-

干渉計駆動中は560mWほどの熱を鏡が吸収する。
これをIMに逃がさないでTMの温度が上がってしまう。



Fiberの要求値:

鏡を20Kに保つ

溶接部を持つfiberでも熱を引けるかを試験

Bondingの要求値:

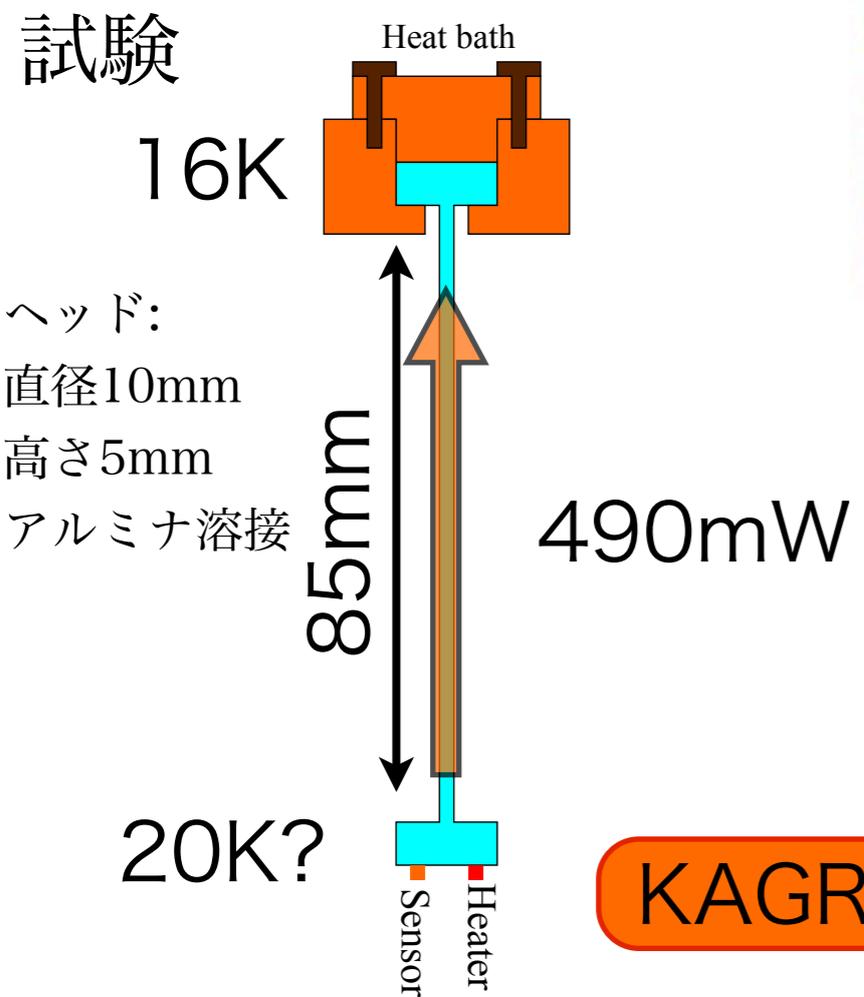
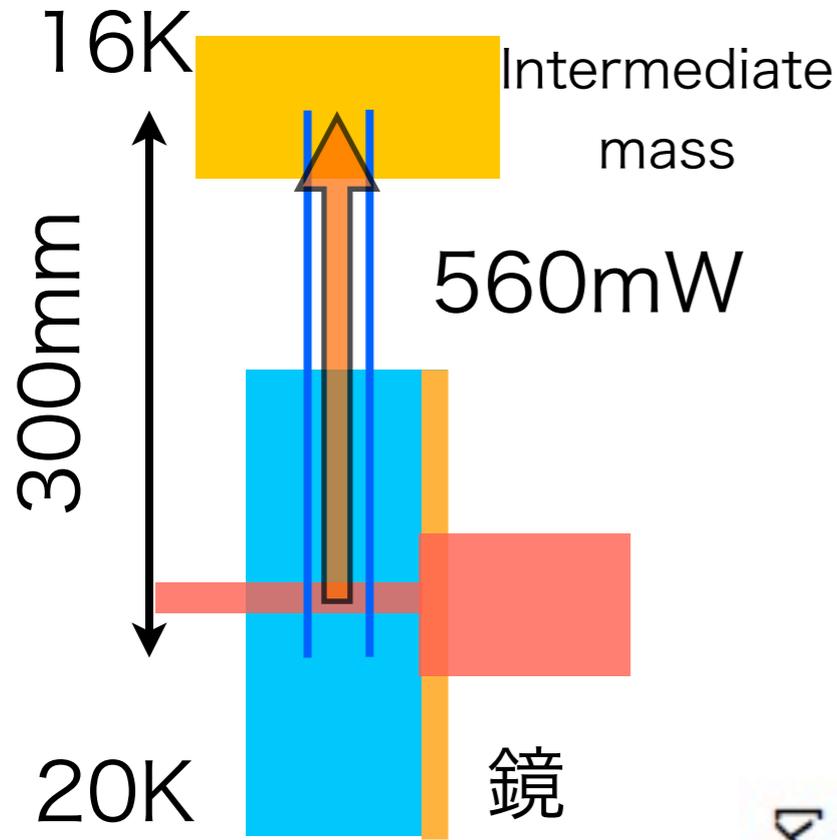
接着面の温度差が0.1K以下

$$HCB : \alpha > 1000W/m^2/K \quad (A = 48cm^2)$$

$$InB : \alpha > 3000W/m^2/K \quad (A = 16cm^2)$$

熱伝達率

KAGRA



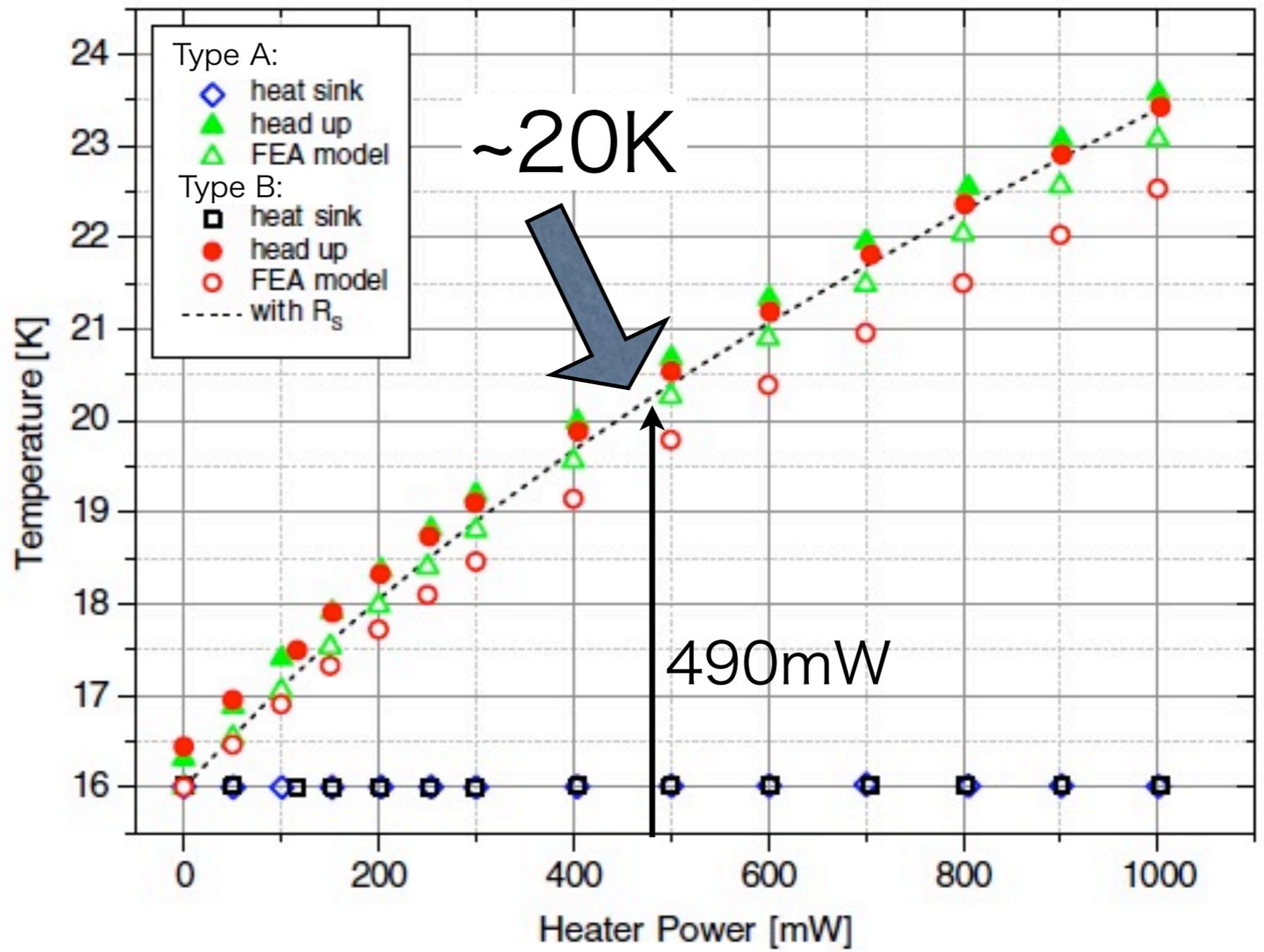
熱伝導測定

-ファイバー- 熱負荷試験

このページ内容は
A. Khalaidovski et al. CQG 31 (2014) 105004
で発表した。

Loss測定と同一サンプル

解析及びシミュレーションは共同研究者

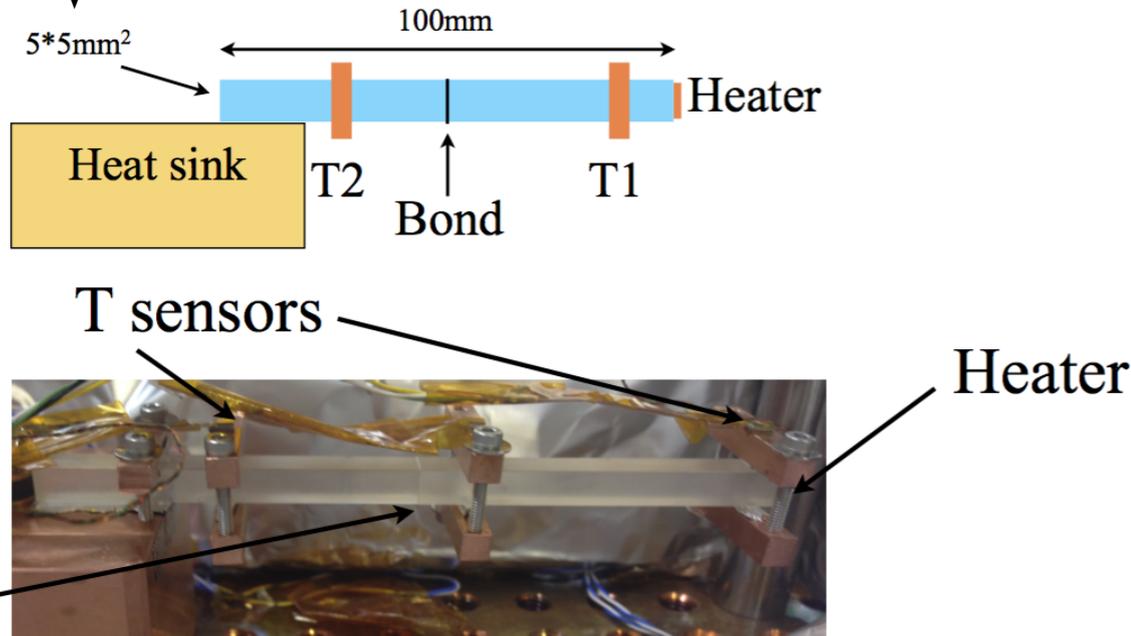


KAGRAと同じ状況を模擬し、fiber先端で~20Kを確認

熱伝導測定

- Bonding sample 測定装置及び結果 -

熱伝達率を測定



Heaterで与えた熱量

$$\Delta P = A\alpha\Delta T$$

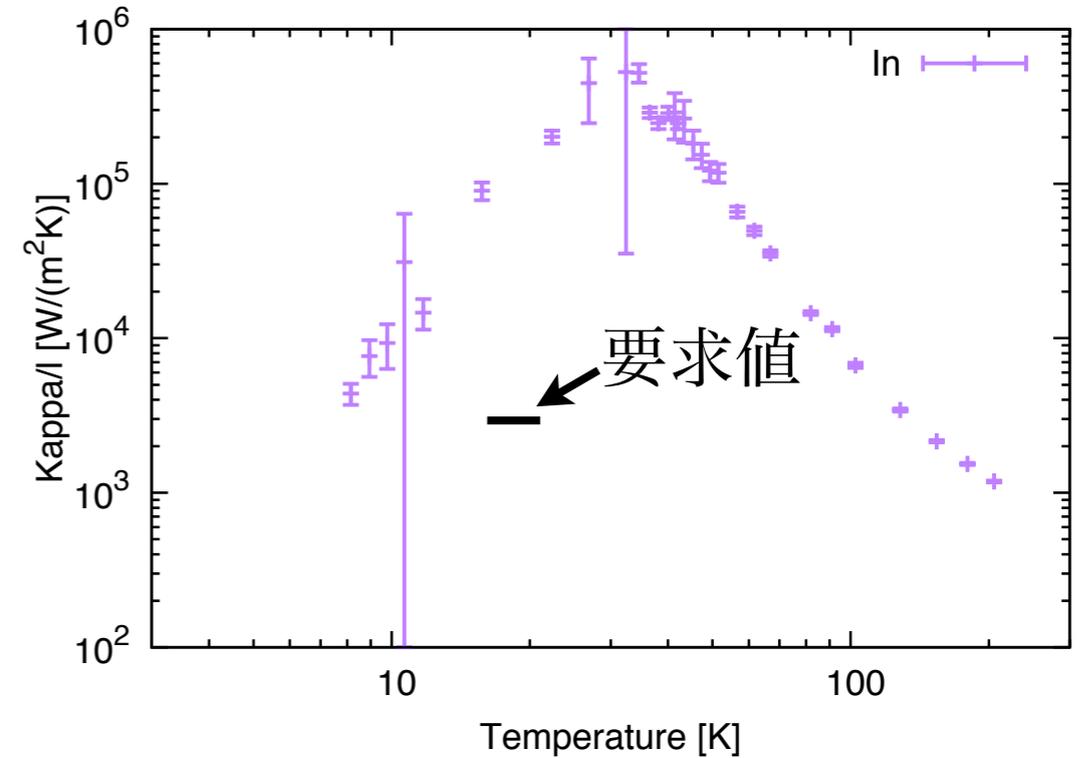
サンプルの断面積

温度計間の温度差

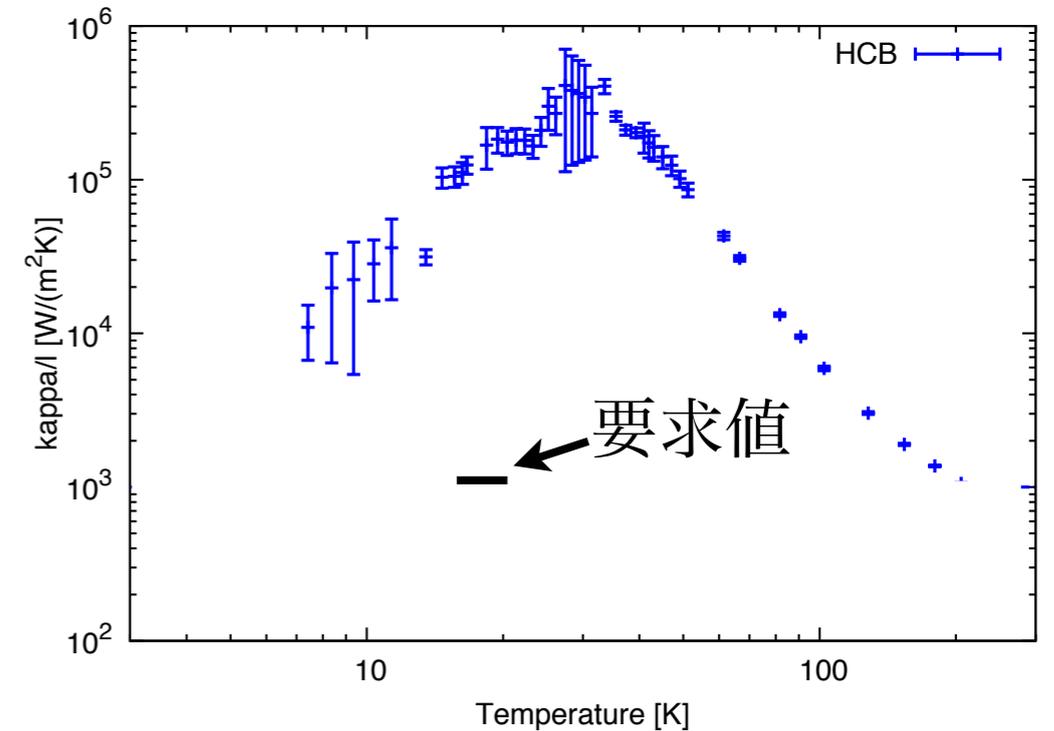
熱伝達率が分かる

Indium bonding, HCBの熱抵抗が問題になることはない。

Indium bonding面の熱伝達率



HCB面の熱伝達率



まとめ

★KAGRAは世界初のkm級低温重力波望遠鏡(2017年に本格的な観測が開始)

◆神岡地下の地面振動の静かな環境での観測

◆**低温鏡を使用しての熱雑音抑制**

★本研究は最も重要な部分の一つcryogenic suspension systemの研究

◆Sapphire suspensionの**設計及び基礎試験を行った。**

• Suspensionの熱雑音推定のために**mechanical loss測定**を行った。

→Fiber, indium bonding, HCB, **全てが要求値を満たした。**

• 干渉計稼働時に鏡を低温に保てるかを推定する**熱抵抗試験**を行った。

→Fiber, indium bonding, HCB, **全てが要求値を満たした。**

• 鏡を安全に吊れるかを確認するための**強度試験**

→Fiberの強度試験は共同研究者によってなされ、十分強いことが確認されている。

→HCBの熱サイクル後の強度試験を行い、**十分な強度を持つことを確認。**

**本研究によって、KAGRAの目標感度を達成するための
技術が獲得された。**

KAGRAのみならず、次世代の重力波望遠鏡への重要なマイルストーンともなった。

おわり