

LCGT熱シールド用金属の 低温における波長10 μm での反射率測定

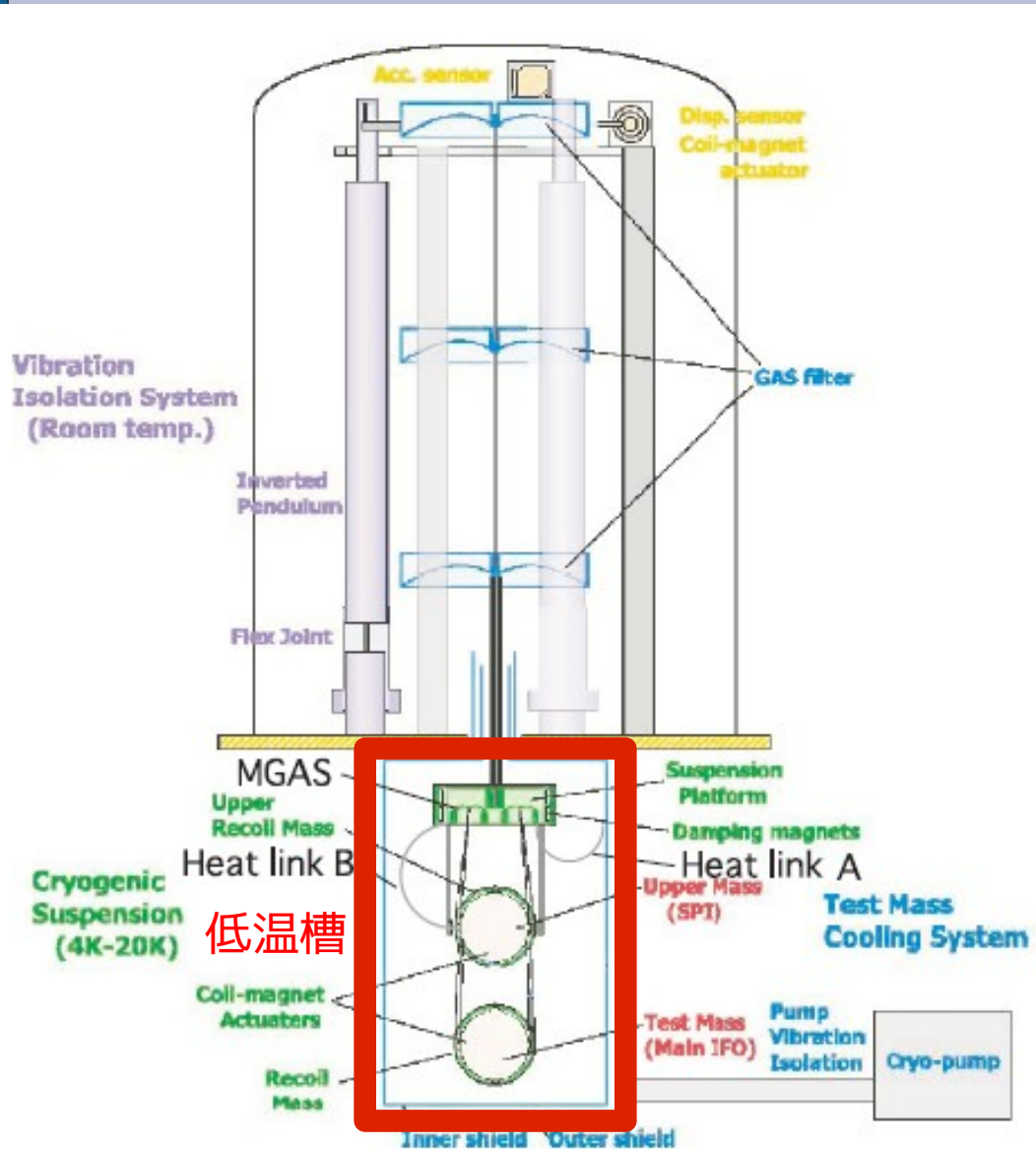
2010.12.3
重力波研究交流会

東京大学理学系研究科物理学専攻
宇宙線研究所 黒田研究室 修士1年
榊原裕介

内容

- 研究の背景
 - LCGTのradiation shield
- 低温槽でのradiation shieldの役割
 - 熱放射率 (emissivity) ϵ
 - 反射率
- 金属の反射率の温度依存性
 - 理論 (Drudeのモデル)
 - 測定

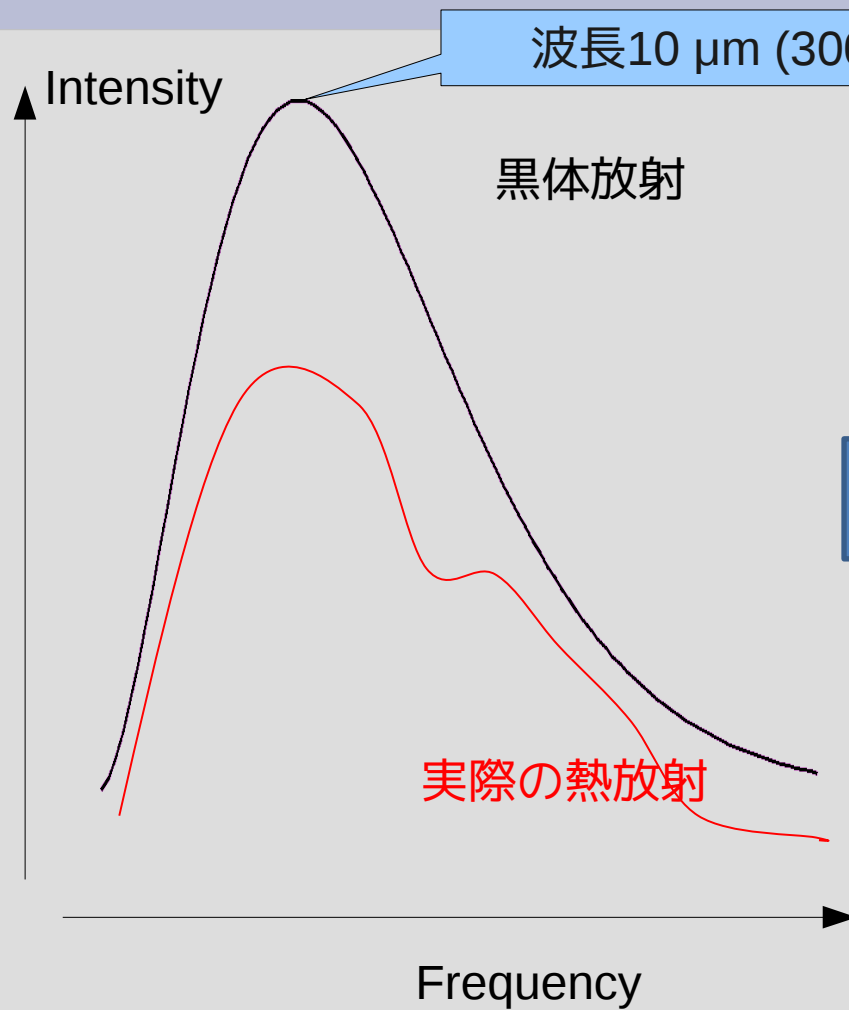
LCGT



- 鏡の冷却
 - 熱伝導
 - 300 K の熱放射を抑える必要
 - Radiation shieldが必要
- 300 K の部分、鏡、radiation shieldが共通の真空
 - 汚染のないradiation shieldが必要

概略図 (LCGT design document)

熱放射率(emissivity) ϵ

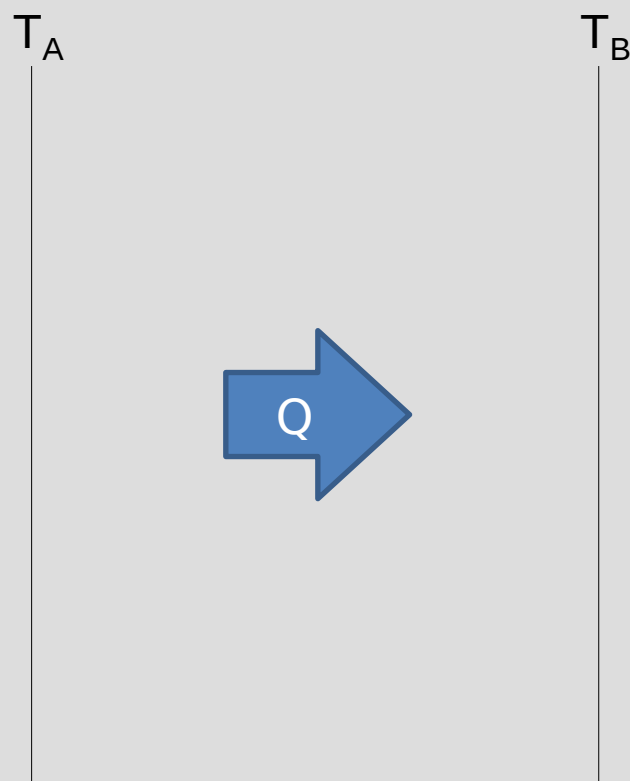


$$\frac{Q}{S} = \sigma T^4$$

$$\frac{Q}{S} = \epsilon \sigma T^4$$

Q:熱量 S:面積 T:温度
 σ :Stefan-Boltzmann定数

Radiation shieldのない場合



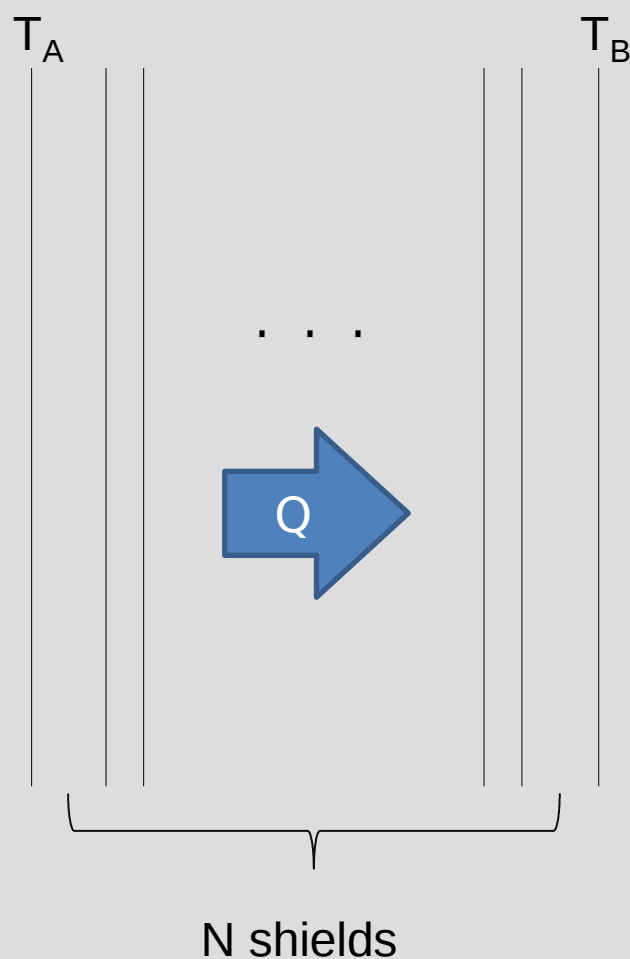
- 面積 S 、温度 T_A および T_B の2枚の板
- 放射熱の流れ

$$\frac{Q}{S} = \epsilon' \sigma (T_A^4 - T_B^4)$$

ただし

$$\epsilon' = \frac{1}{\frac{2}{\epsilon} - 1}$$

Radiation shieldのある場合



- N 枚のshield

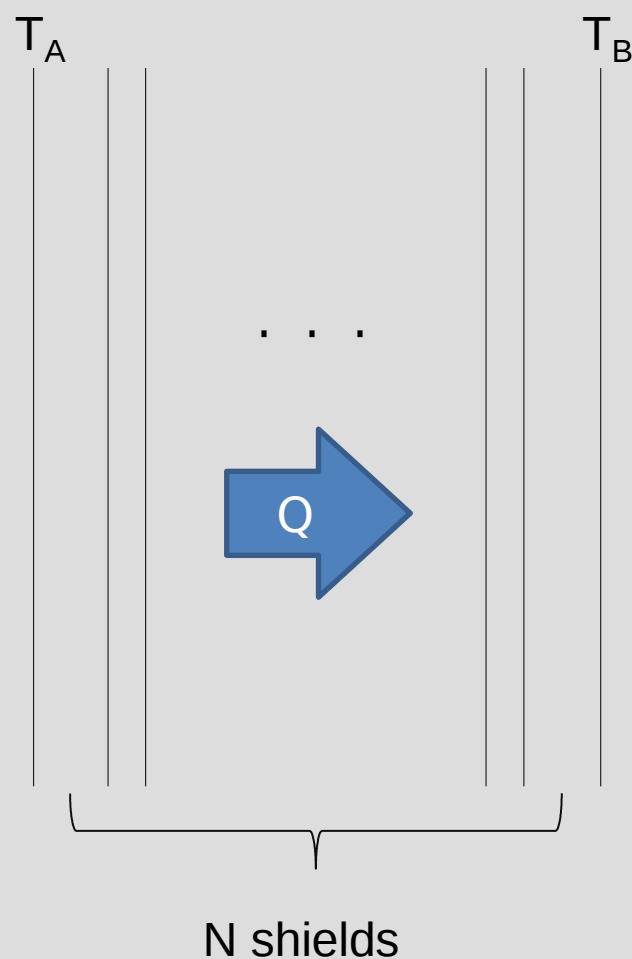
- 放射熱の流れ

$$\frac{Q}{S} = \frac{1}{N+1} \epsilon' \sigma (T_A^4 - T_B^4)$$

ただし

$$\epsilon' = \frac{1}{\frac{2}{\epsilon} - 1}$$

Radiation shieldのある場合



- 熱の流れ

$$\frac{Q}{S} = \frac{1}{N+1} \epsilon' \sigma (T_A^4 - T_B^4)$$

ただし

$$\epsilon' = \frac{1}{\frac{2}{\epsilon} - 1}$$

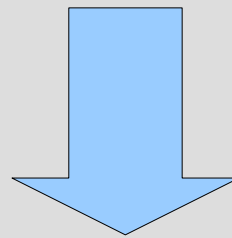
- Q を小さくしたい
 - N を大きくする
 - ϵ を小さくする

Super Insulator

- Nを大きくする
 - $N=20\sim30$
 - アルミニウムを蒸着したマイラーフィルム
 - 問題点
 - 表面積が大きく脱ガスが大きい
 - 有機物質(マイラーフィルム)が汚染の原因になる

Radiation shield の候補

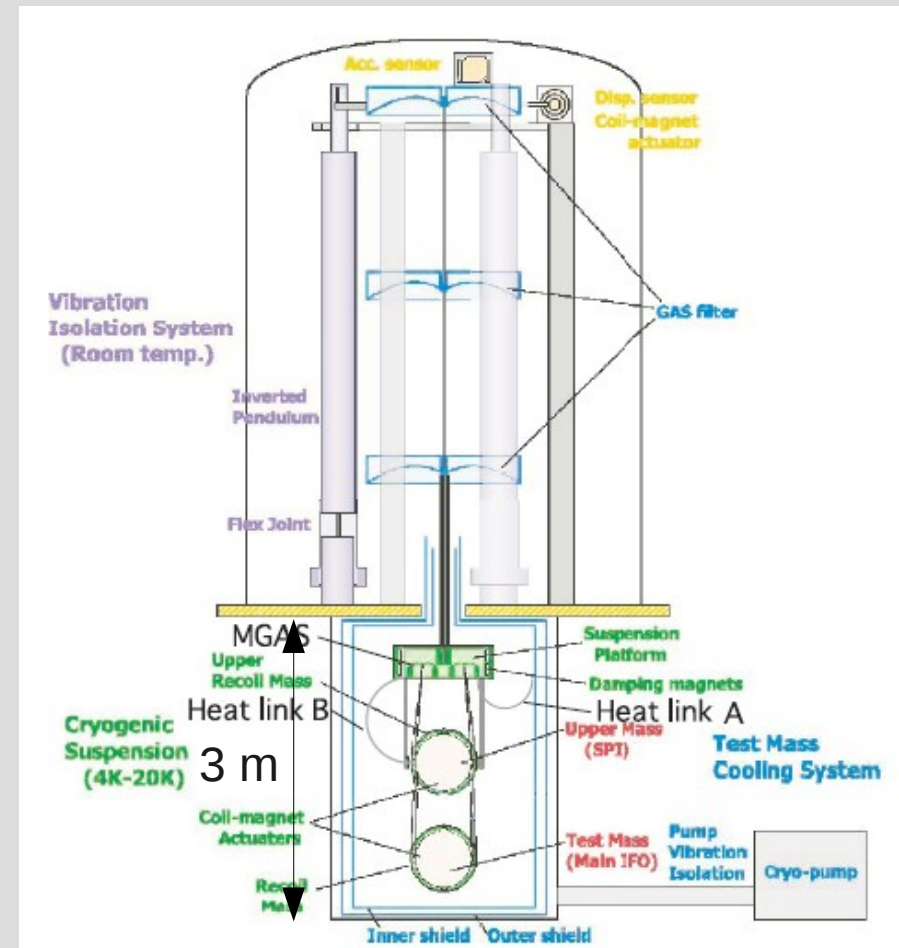
- ε を小さくする
 - 金属板
 - 問題点
 - $N=3\sim 4$
 - 低温で熱放射率の低い金属が必要



この測定の動機

LCGTの要求値

- $\varepsilon=0.07$
 - 低温槽壁面の表面積 $S=25 \text{ m}^2$
 - 冷凍機的能力 100 W (80 K)
 - $N=3$



2 m

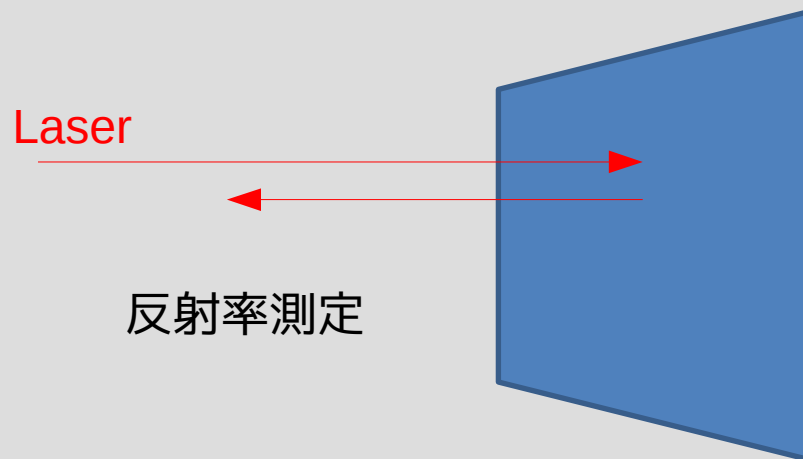
10/30

熱放射率(emissivity) ϵ の測定

- 反射率 r を測定し関係

$$\epsilon = 1 - r$$

を用いて求める

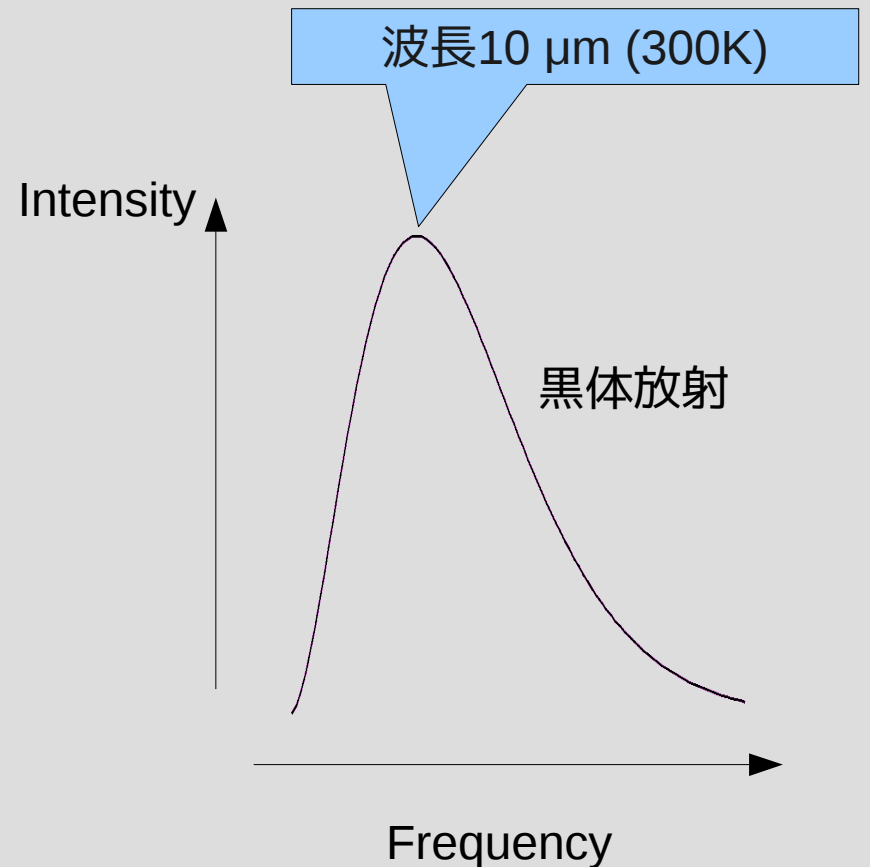


熱放射率(emissivity) ϵ の測定

- 本来 ϵ は全波長の放射を積分して求める必要
- 波長 $10\ \mu\text{m}$ における反射率を測定
- 以下では $10\ \mu\text{m}$ における反射率 r から

$$\epsilon = 1 - r$$

と求めたものを熱放射率(emissivity)と呼ぶ



反射率の温度依存性（Drudeのモデル）

- 金属の反射率は電気伝導率と相関がある
 - 低温では
 - 電気伝導率が大さい
 - 反射率が大さい

反射率の温度依存性 (Drudeのモデル)

- 金属中の自由電子の運動方程式
(τ :緩和時間)

$$m\dot{\mathbf{v}} = -e\mathbf{E} - m\frac{\mathbf{v}}{\tau}$$

- (複素) 電気伝導率

$$\sigma = \frac{Ne^2\tau}{m(1 - i\omega\tau)}$$

- 一般的な意味の電気伝導率
($\omega=0$)

$$\sigma_0 = \frac{Ne^2\tau}{m}$$

- 複素屈折率

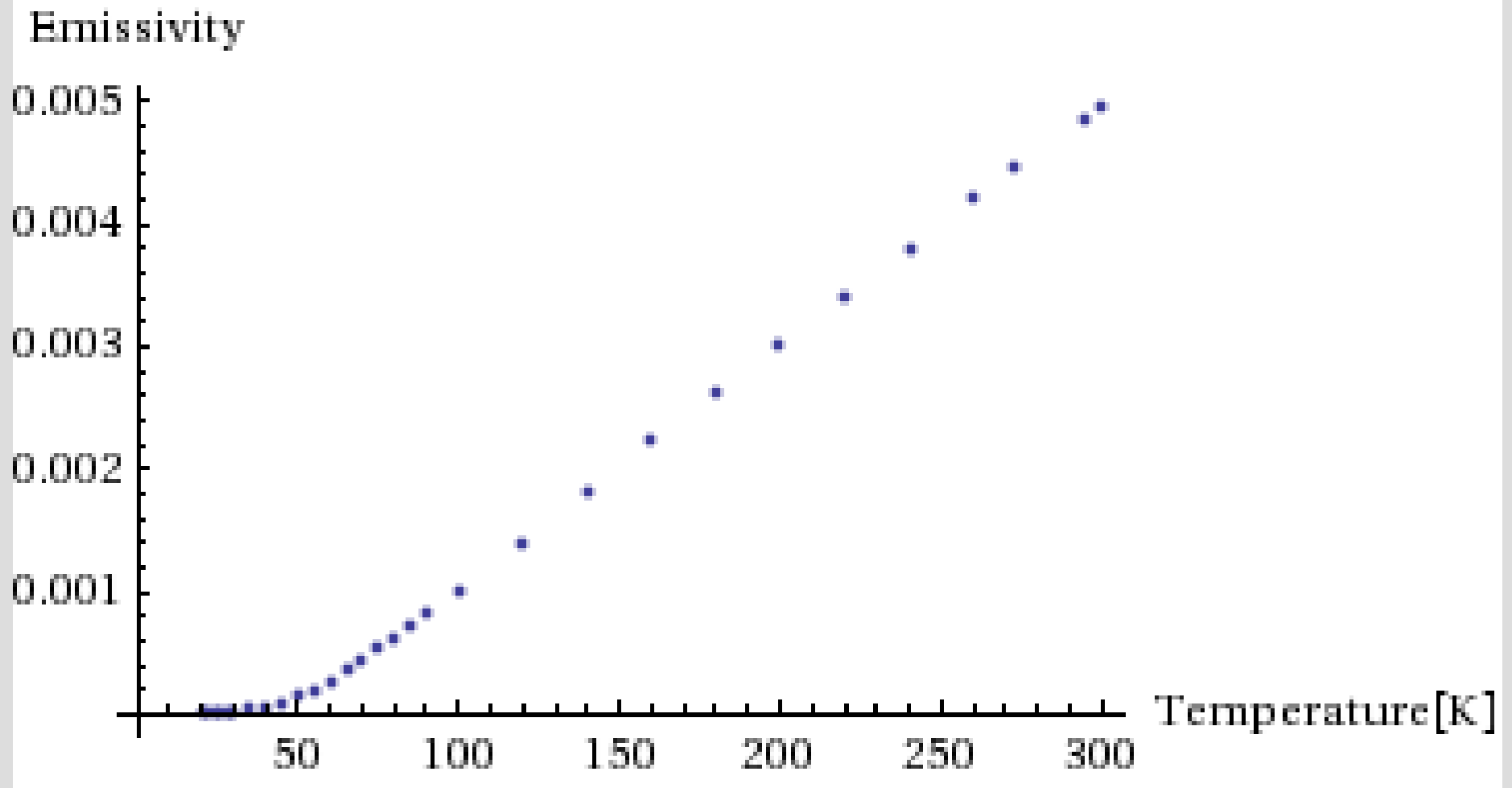
$$\begin{aligned} n^2 &= 1 + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \\ &= 1 - \frac{Ne^2\tau}{m\epsilon_0} \frac{1}{\omega(\omega\tau + i)} \end{aligned}$$

- 反射率

- τ すなわち電気伝導率 σ_0 の関数

$$r = \left| \frac{n - 1}{n + 1} \right|^2$$

反射率の温度依存性 (Drudeのモデル)

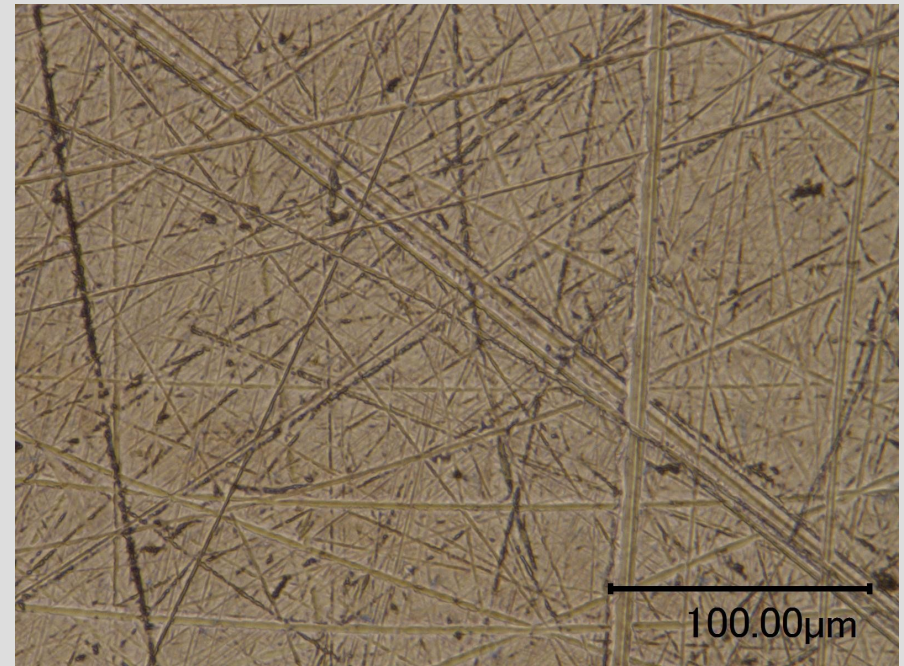
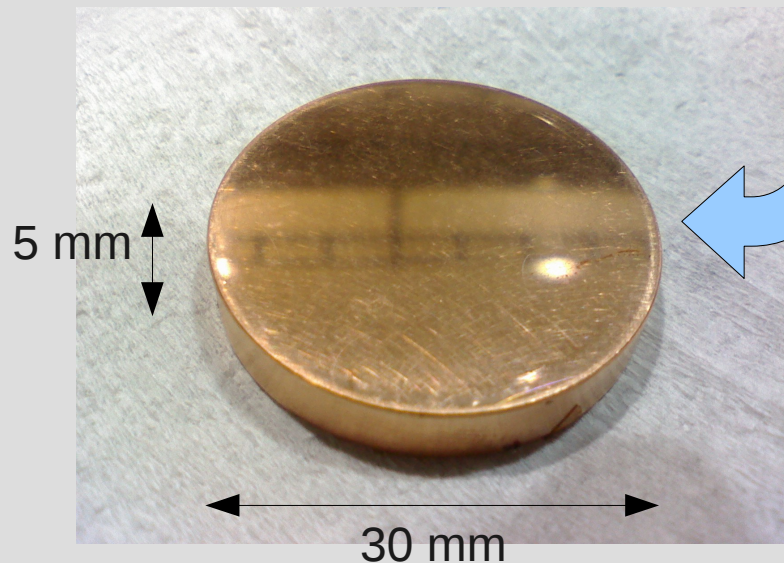


反射率の温度依存性（Drudeのモデル）

- 簡単なモデルなので、定量的には一致しないかもしれない
- 低温になるほど熱放射率が下がる傾向は一致すると思われる

今回用いた測定サンプル

- 無酸素銅class-1
(純度99.99 %以上)
- 表面を機械的に研磨



(表面顕微鏡写真、撮影協力：三尾研)

反射率測定

1. 常温での反射率測定

反射回数を多くし、高精度で測定

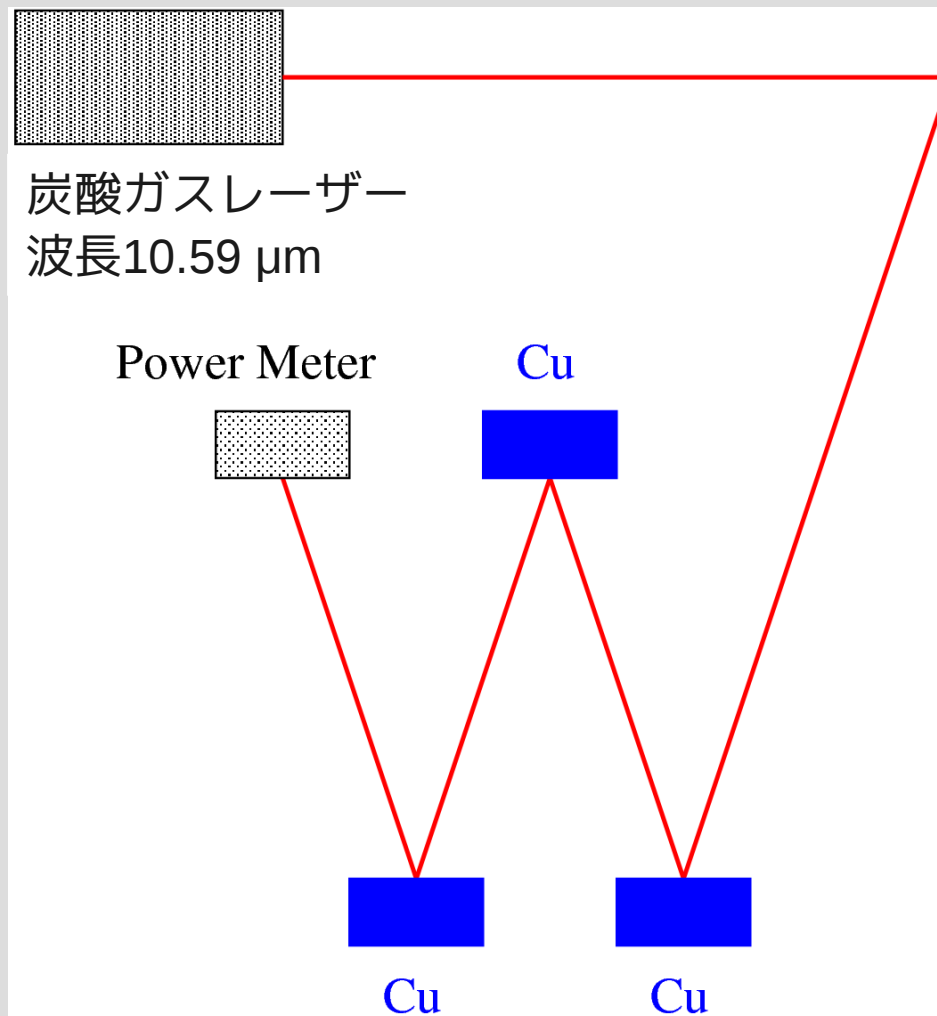
2. 低温での反射率測定

低温槽内で反射回数1回

常温での反射率に対する相対値で測定

常温測定（光学系）

- 下図のような光学系で3回反射で測定



常温測定（光学系）

炭酸ガスレーザー
波長 $10.59\ \mu\text{m}$

laser

パワーメータ

PM

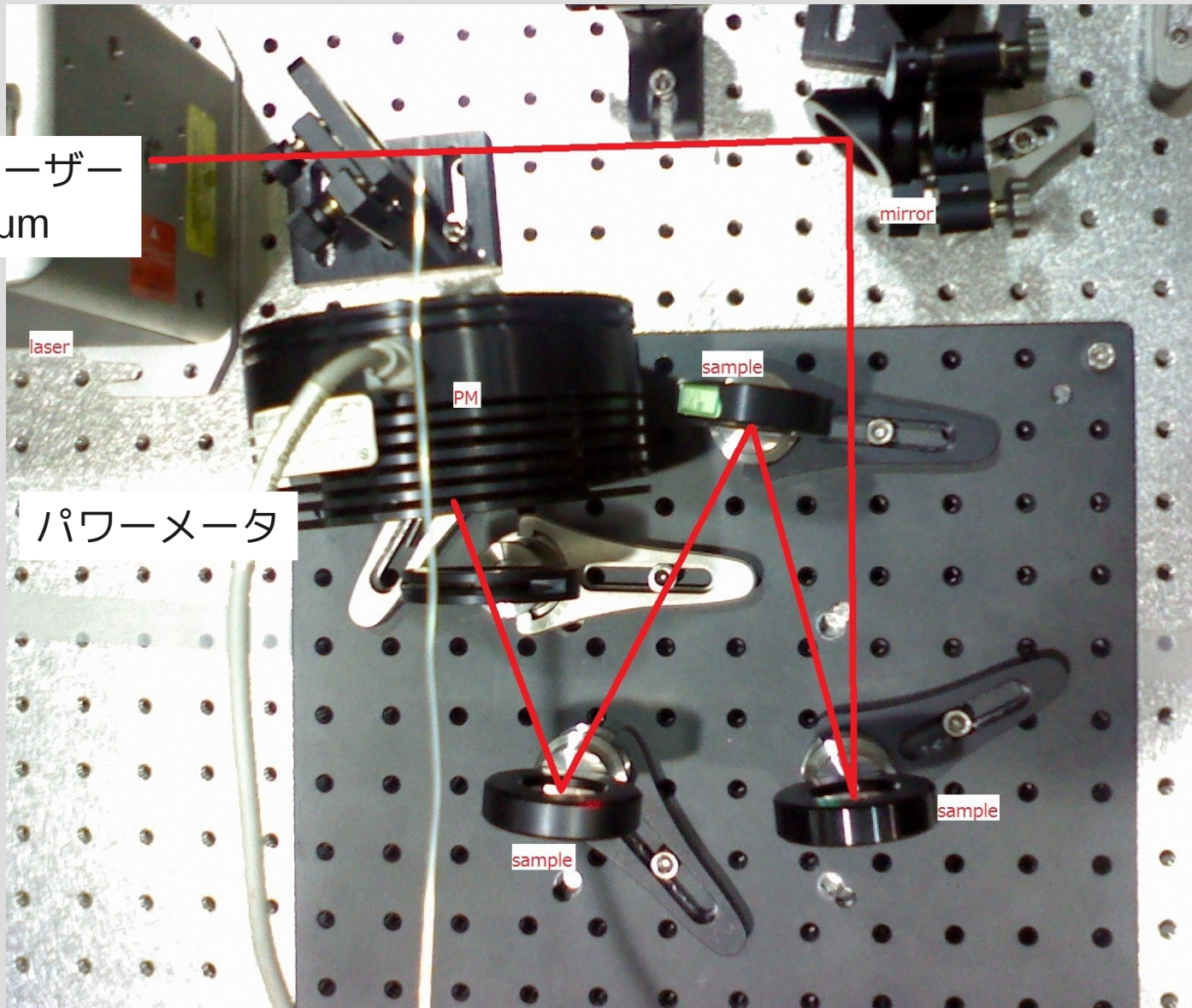
sample

mirror

sample

sample

100 mm



常温測定（結果）

- 常温での波長10 μm における銅の反射率

$$r = \left(\frac{5.71 \text{ W}}{6.23 \text{ W}} \right)^{1/3} = 0.971 \pm 0.003$$

- 常温での熱放射率

$$\epsilon = 1 - r = 0.029 \pm 0.003$$

低温測定（方法）

- サンプルに温度計を取り付け、温度とともに反射光の強度を記録
- 反射回数は1回のみ
 - 低温槽内のスペースの制限
- 測定精度はレーザーの強度変動、パワーメータの測定精度で制限される
 - 反射率の絶対値で約0.01

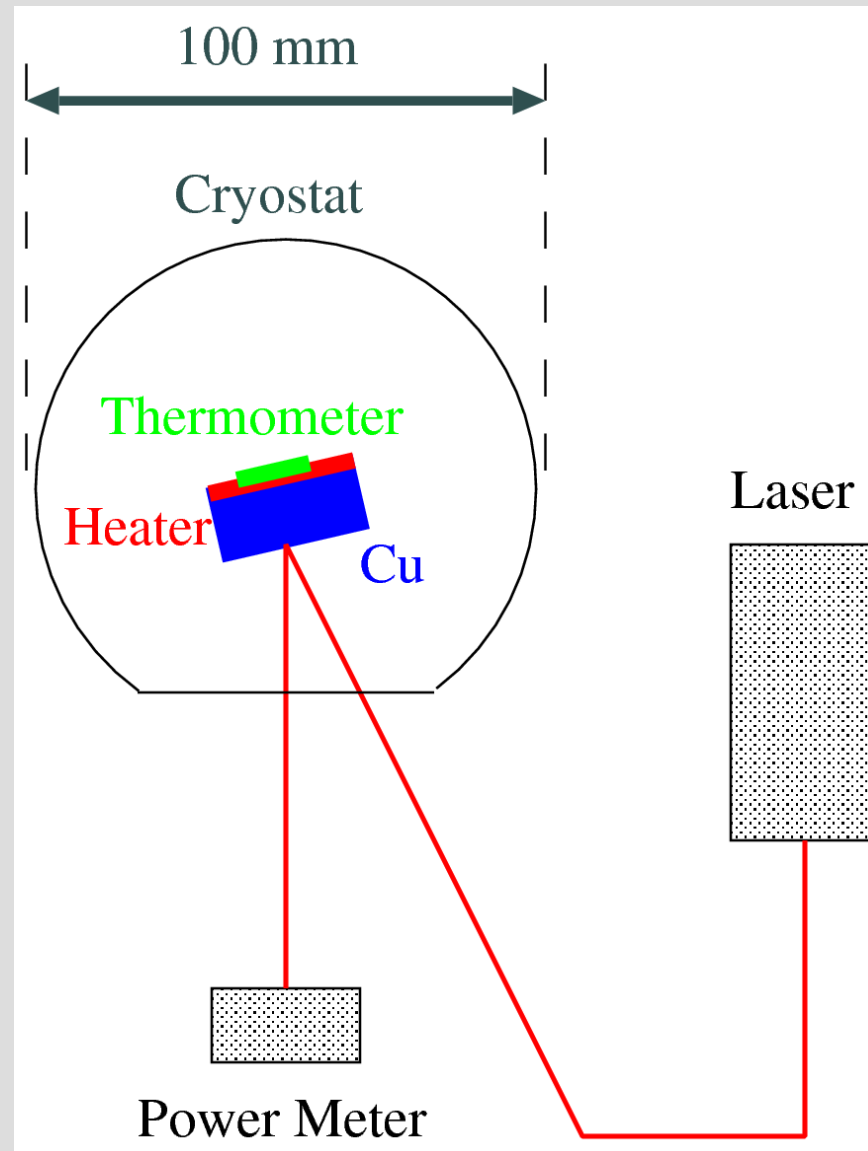
低温測定（問題点）

- 測定値は真空度の影響を受けやすい
- 真空度がよくない場合
 - サンプル表面にガスが吸着し低温になるほど熱放射率が上がる傾向があった
 - 測定値に再現性がなかった（同じ温度でも吸着のために測定値が異なっていた）

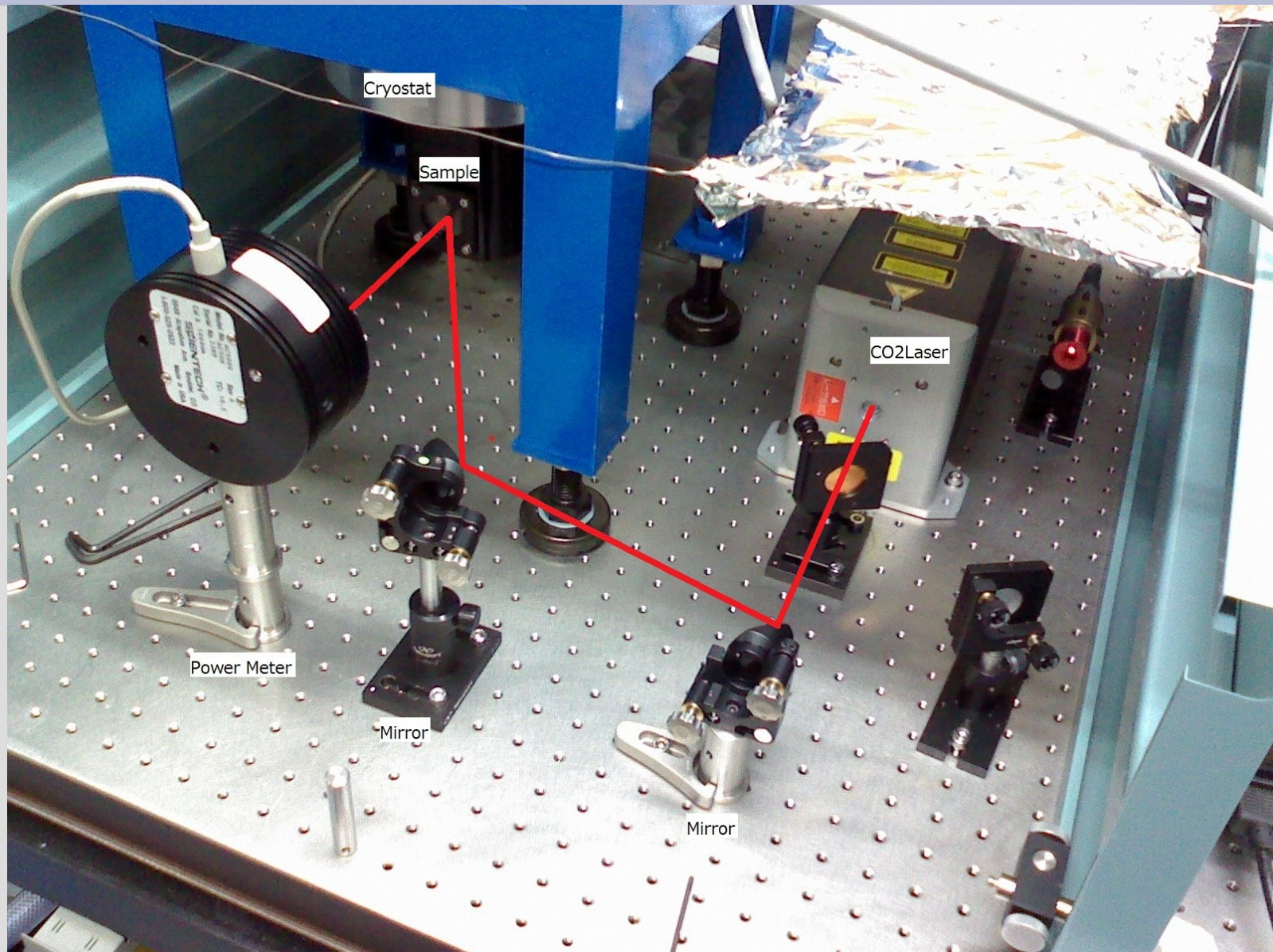
低温測定（対策）

- なるべく真空度を上げる
 - 常温で 10^{-4} Pa
- サンプル表面にガスが吸着するのを防ぐため、サンプル裏面にヒーターを取り付け、周囲よりサンプルの方が高温になるようにする

低温測定（光学系）

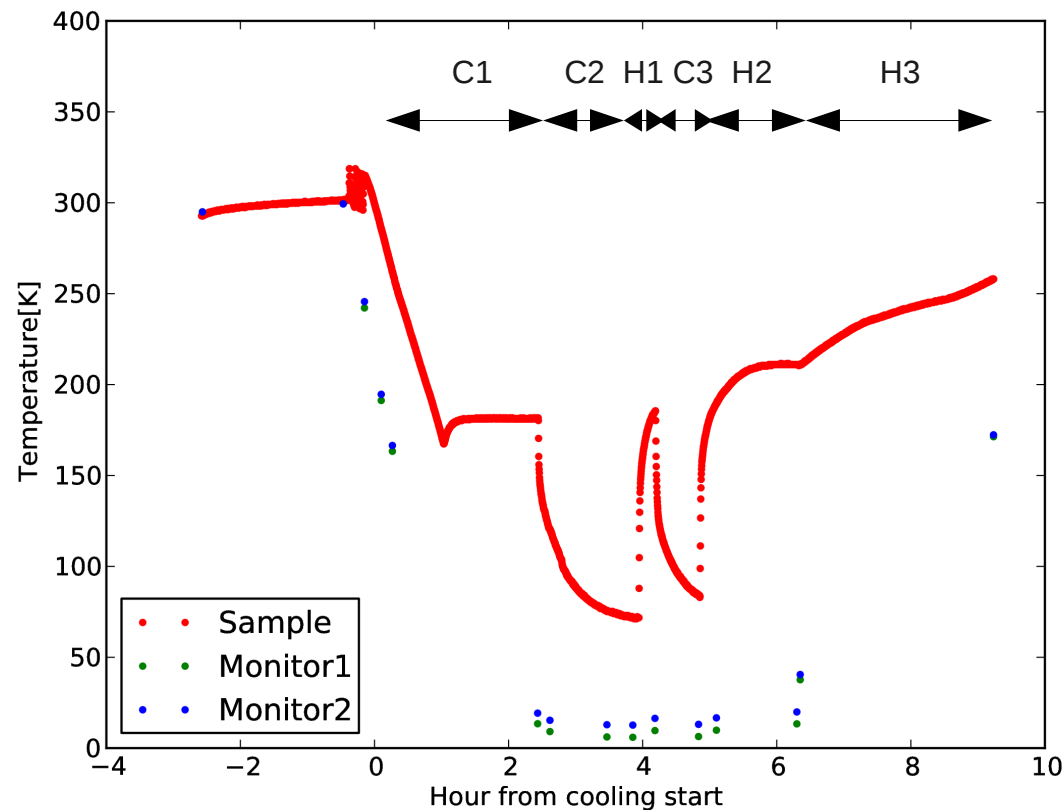


低温測定（光学系）



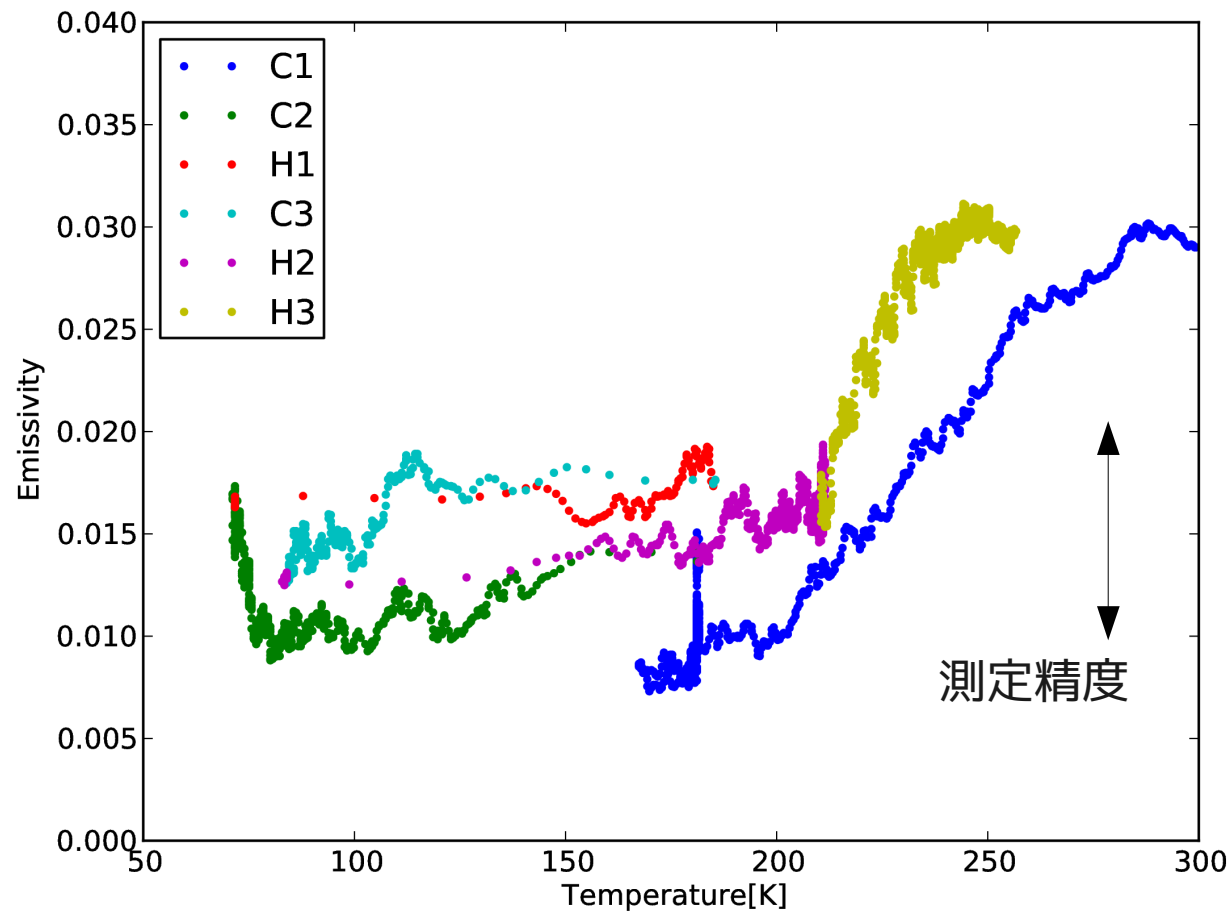
低温測定（温度変化）

- 再現性（同じ温度で同じ反射率が得られる）の確認のため冷却、昇温を何度か繰り返した



低温測定（結果）

- LCGTの要求値 $\varepsilon=0.07$ を満たす



まとめ

- 低温での銅の反射率を測定
- 銅はLCGTの要求値を満たす
- 表面への吸着ガスの影響が大きい
- 冷却、昇温を何回か繰り返したときの測定値に再現性が認められた
- 今後、他のサンプルを測定

共同研究者

黒田和明, 高橋竜太郎, 三代木伸二, 齋藤芳男, 鈴木敏一, 三尾典克,
森脇成典, 大前宣昭, 武者満