



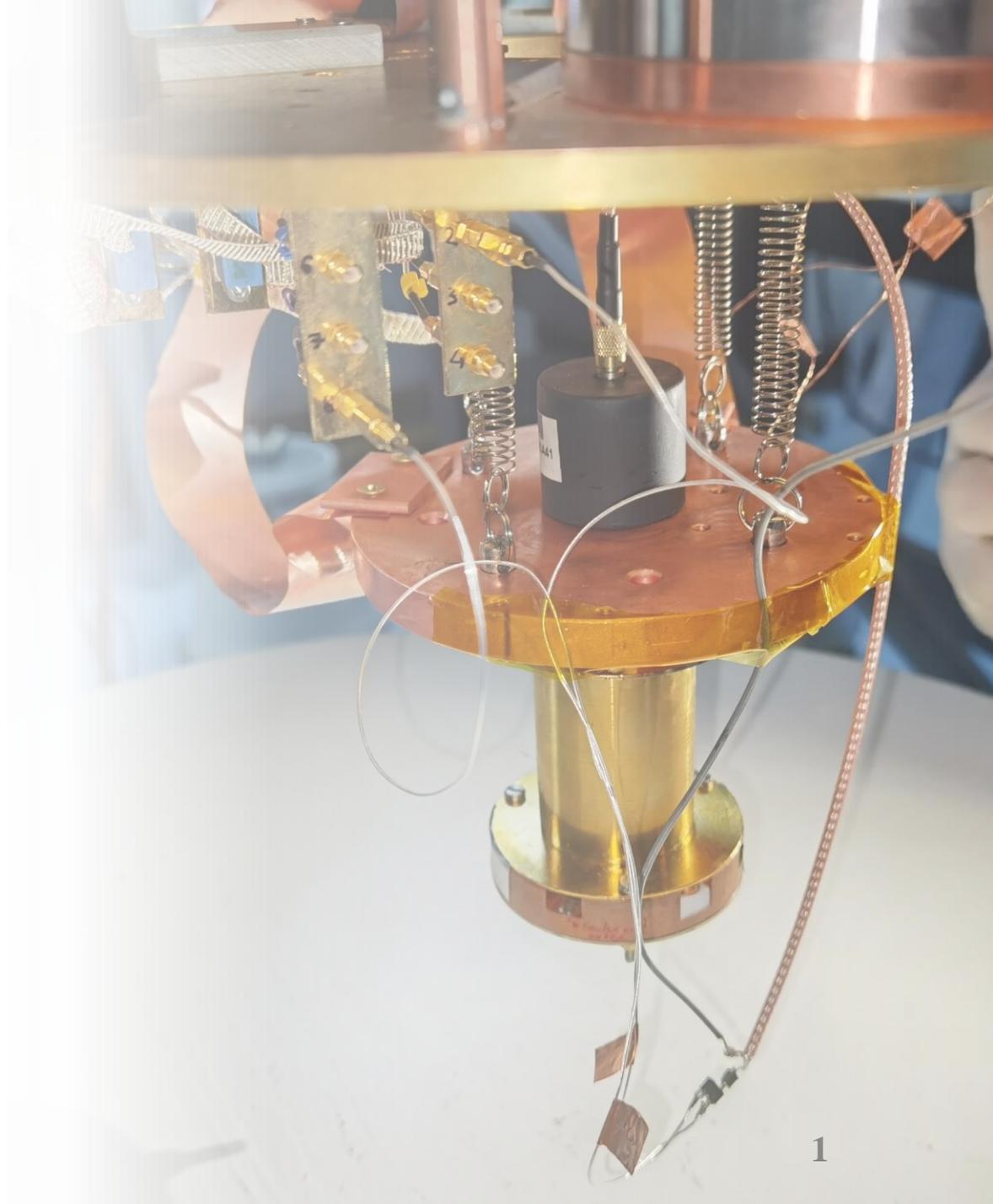
# 锦屏低温晶体量热器实验减振系统研究

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

汇报人：曹嘉璇 复旦大学

代表CUPID-CJPL

2023年05月09日





# 目录

## 一、 课题背景

- 低温晶体量热器
- CUPID-CJPL实验
- 振动解耦的重要性

## 二、 减振系统设计

- 减振系统设计
- 振动测量方法

## 三、 减振效果检验

- 振动测试结果
- 量热器读出信号

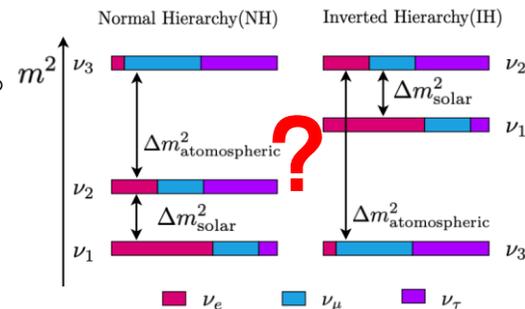
## 四、 总结

- 现阶段总结
- 后续改进计划

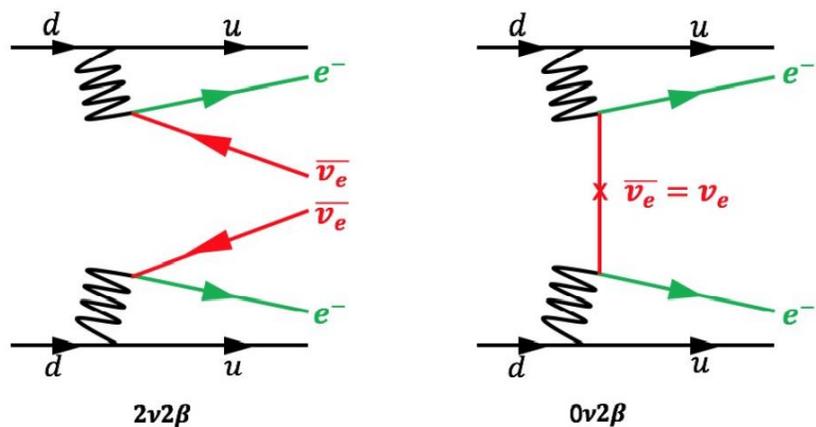
质量 电荷 自旋	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2 <b>u</b> 上夸克	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 <b>c</b> 粲夸克	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 <b>t</b> 顶夸克	0 0 0 <b>g</b> 胶子	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 <b>H</b> 希格斯玻色子
夸克	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>d</b> 下夸克	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>s</b> 奇夸克	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>b</b> 底夸克	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> 光子	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> 电子	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b><math>\mu</math></b> μ子	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b><math>\tau</math></b> τ子	91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z</b> Z玻色子	
轻子	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_e</math></b> 电子中微子	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_\mu</math></b> μ子中微子	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_\tau</math></b> τ子中微子	80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W</b> W玻色子	规范玻色子

加拿大的SNO实验、日本的超级神冈等发现中微子振荡，表明中微子拥有质量。

$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$



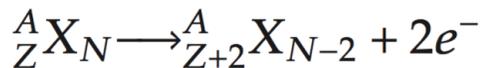
目前只能确定质量差值



通过寻找  $0\nu\beta\beta$  事件，我们便可确定中微子的质量排序与绝对质量，并且这一轻子数破缺的过程也是对标准模型的极大超越

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) \cdot |M^{0\nu}(A, Z)|^2 \cdot \langle \mu \rangle^2$$

$$\langle \mu \rangle^2 = \frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle^2}{m_e^2}, \quad \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 = \left| \sum_{i=1}^3 m_i \cdot U_{ei}^2 \right|^2$$

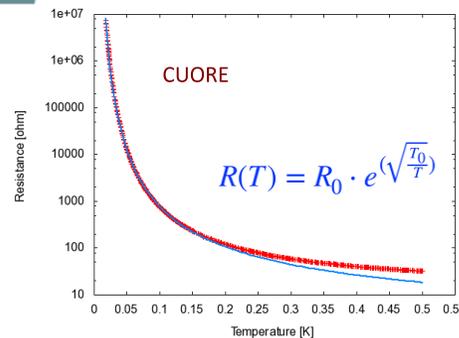
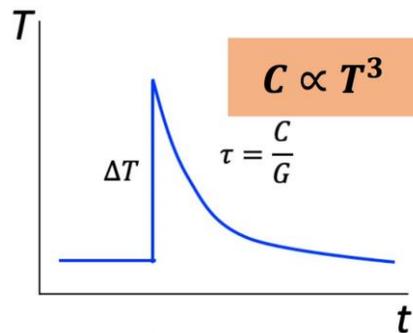
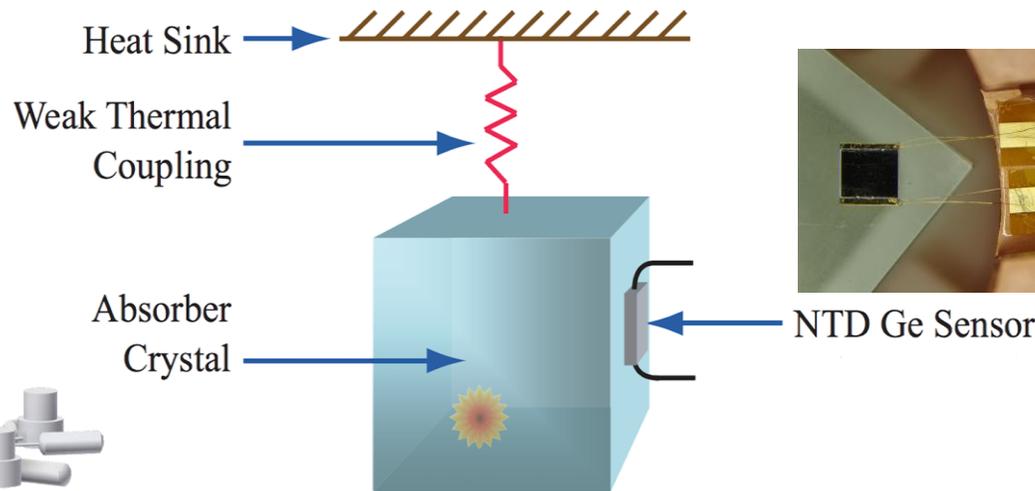
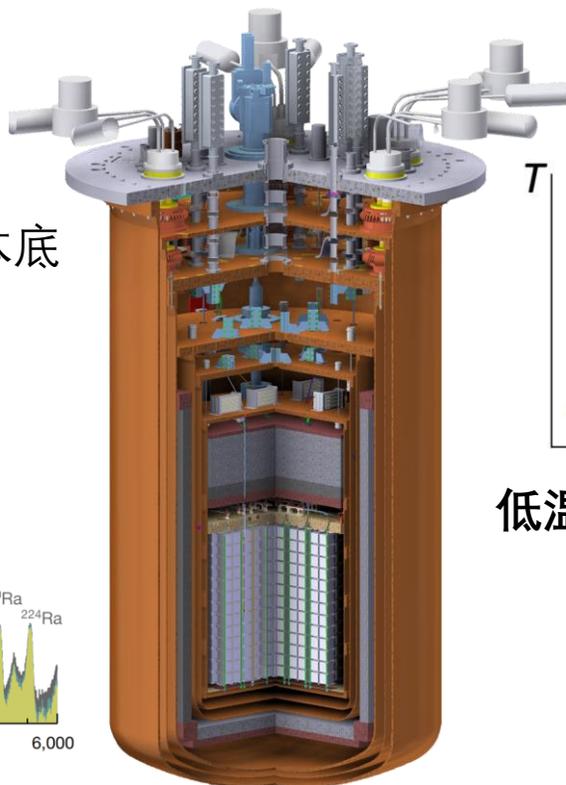
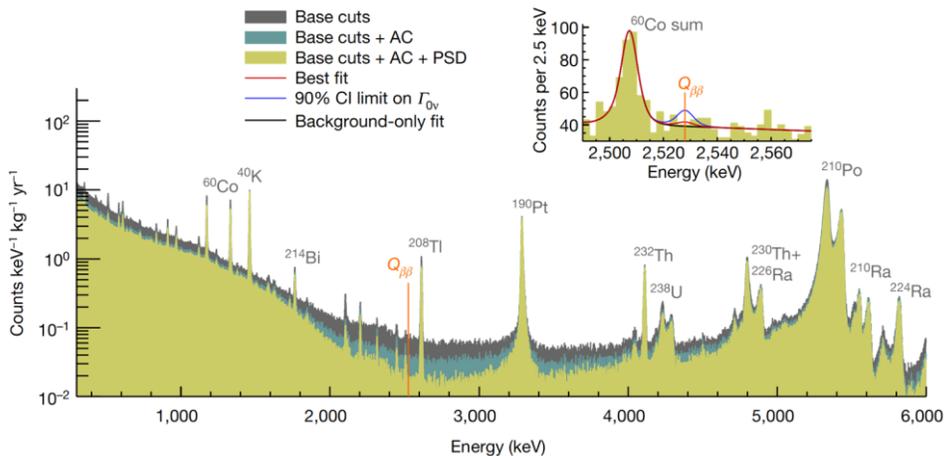


## CUORE 实验

### CUORE: Cryogenic Underground Observatory

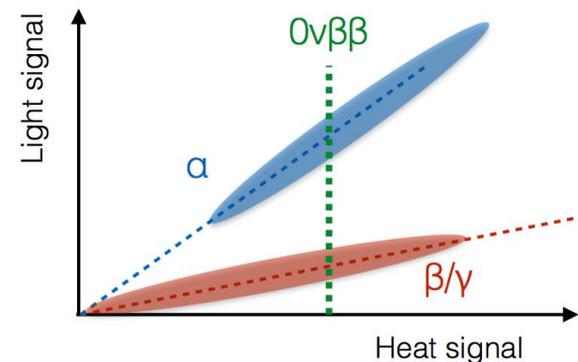
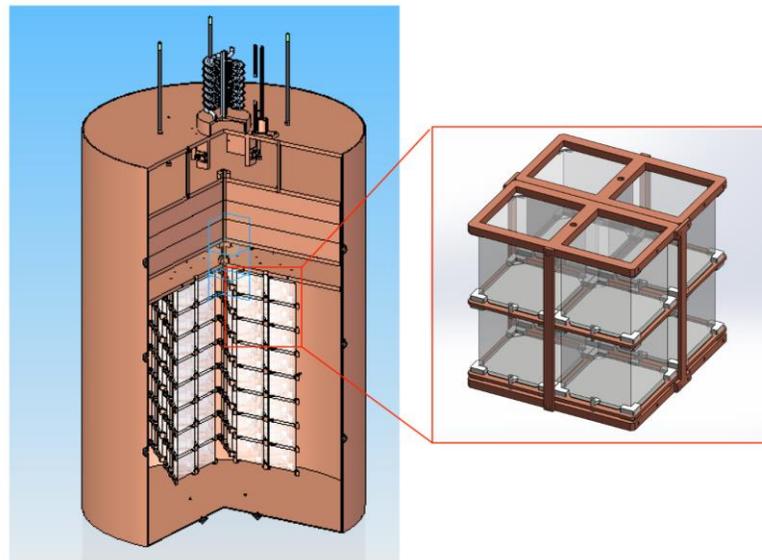
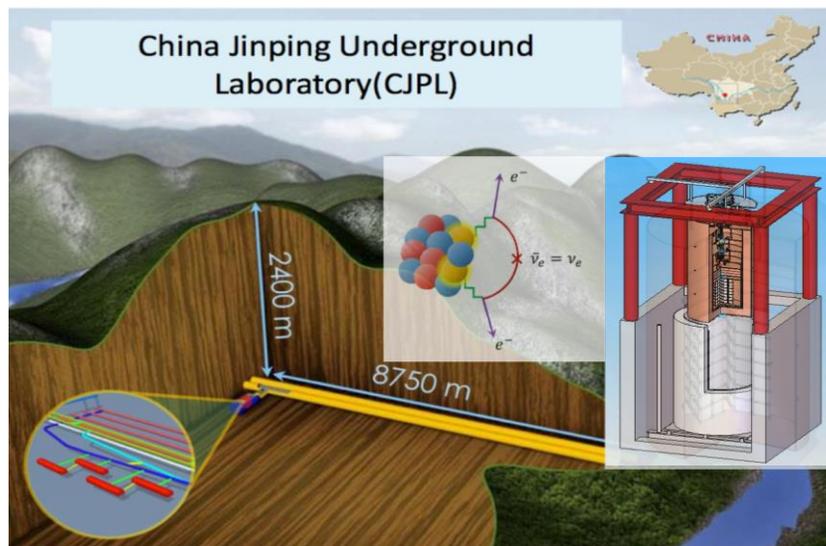
#### for Rare Events

- 988块5 cm边长TeO<sub>2</sub>立方晶体
- 总质量 742 kg
- T @ ~ 10 mK
- 寻找<sup>130</sup>Te的0νββ
- 优势: 更高的能量分辨率以及低本底



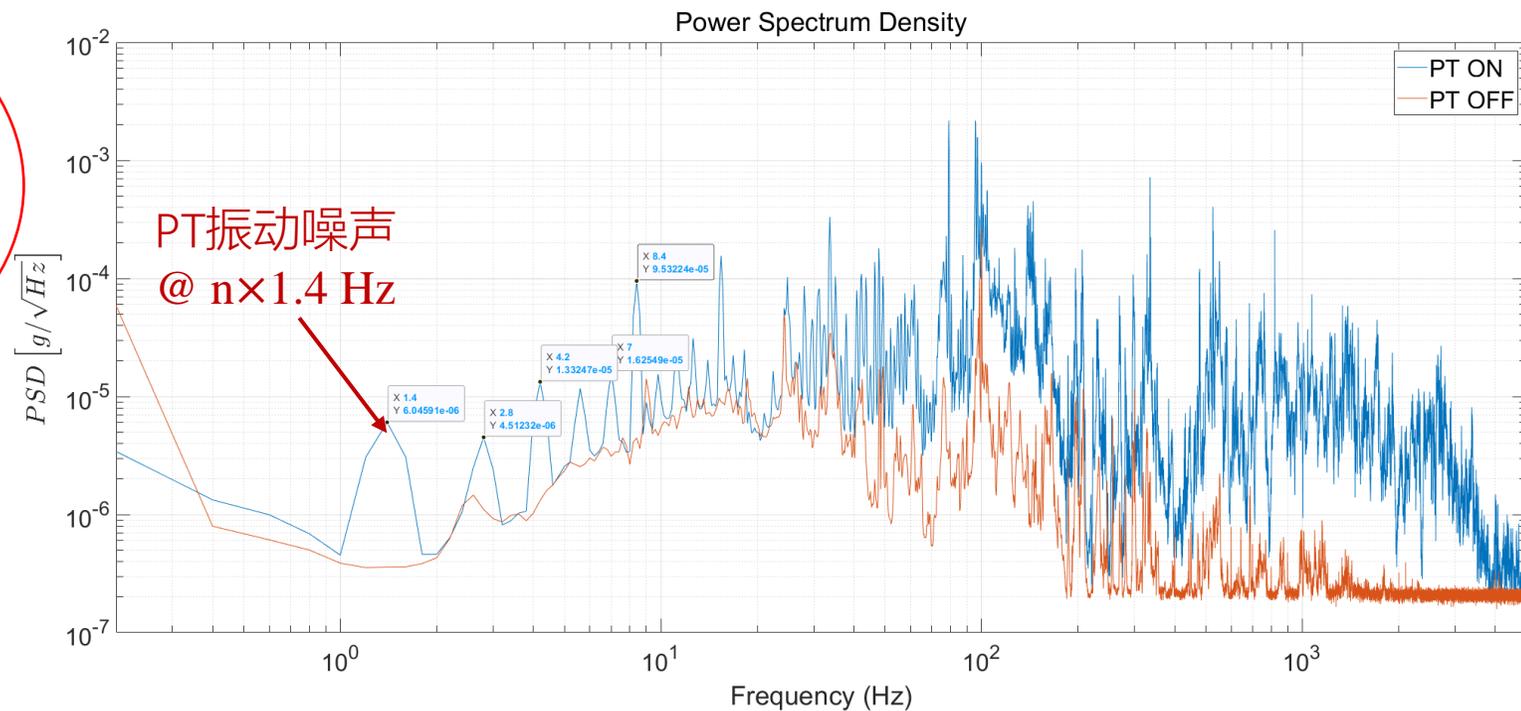
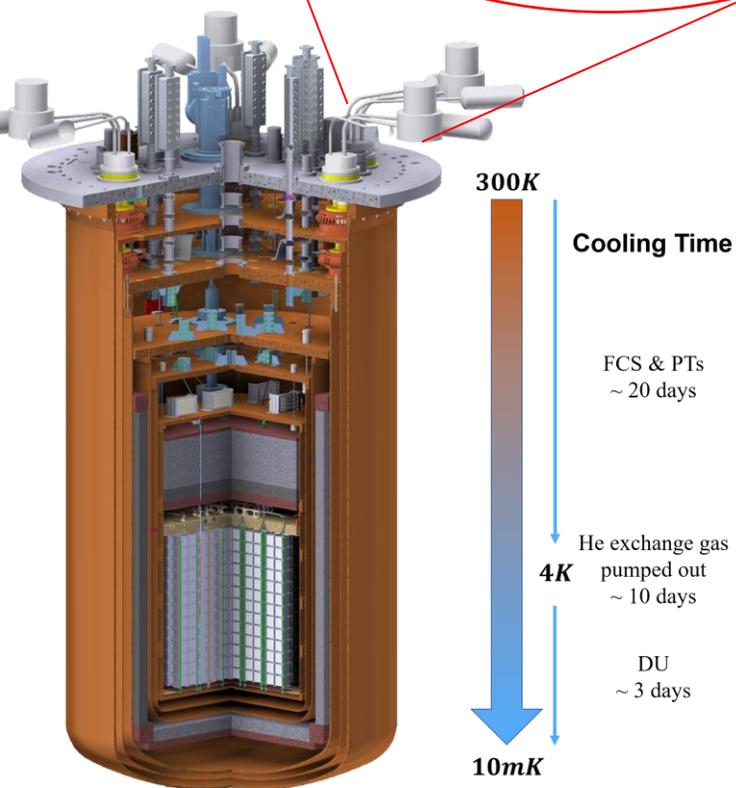
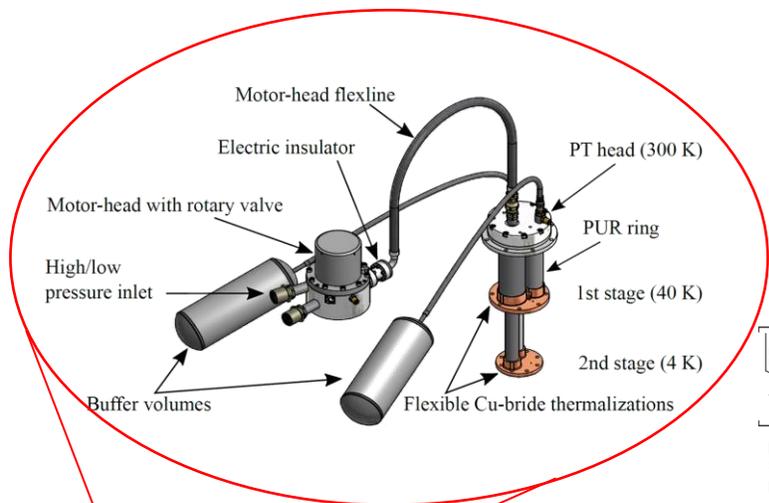
### 低温晶体量热器

- 极低的工作温度 (~10 mK)
- 高能量灵敏度
- 高效率 (>85%) : 双贝塔源即是吸收体
- 高能能量分辨率 (~0.2% FWHM)



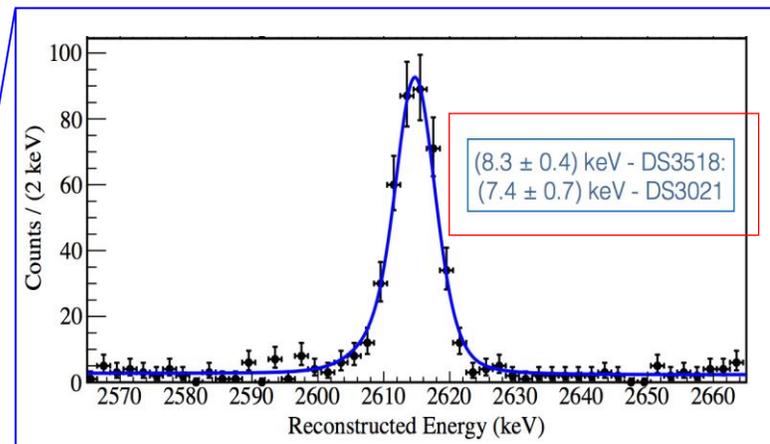
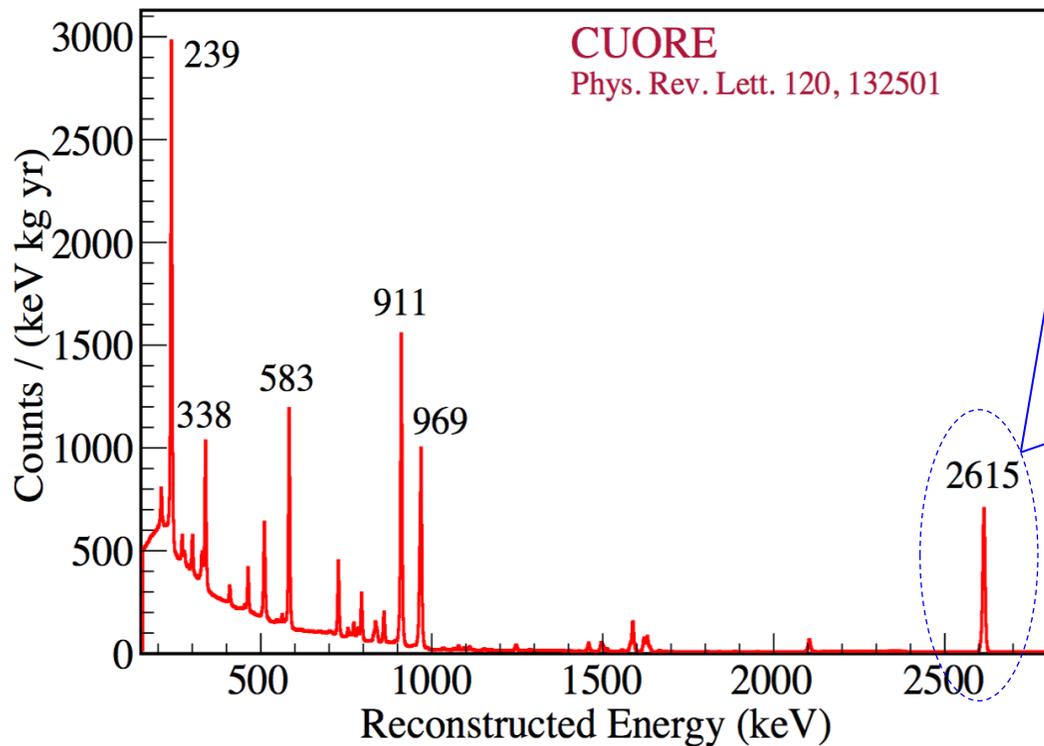
## CUPID-CJPL: A scintillating bolometer experiment for $0\nu\beta\beta$ search at CJPL

- $^{100}\text{Mo}$  钼酸锂晶体
- 高  $Q_{\beta\beta}$  值 ( $\sim 3034$  keV)
- 光热双读出 (进行粒子鉴别)
- 高能量分辨率  $\Gamma_Q \sim 0.2\%$  (FWHM),  $R_{2\nu\beta\beta} < 10^{-5}$

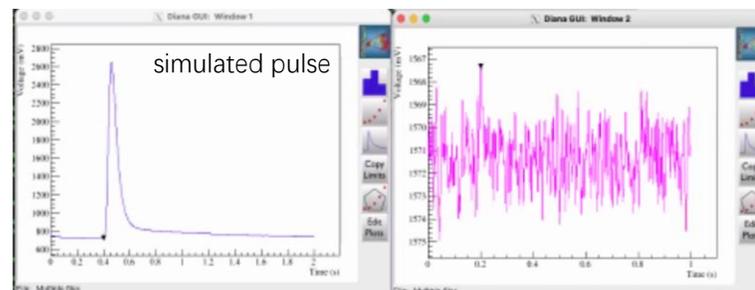


➤ 干式稀释制冷机需要利用脉管（PT）进行初步的降温

➤ PT的运转会引入明显的振动噪声



Expected : 5 keV FWHM @2615keV



$$T_{1/2}^{0\nu}(\text{exp}) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \varepsilon \sqrt{\frac{MT}{b\Delta E}}$$

Isotopic Abundance →  $a$   
 Detection Efficiency →  $\varepsilon$   
 Detector Mass →  $M$   
 Time →  $T$   
 Atomic mass →  $A$   
 Background level (count/keV kg year) →  $b$   
 Energy Resolution →  $\Delta E$

➤ CUORE实验的结果表明

--- 振动噪声对能量分辨率的影响不可忽视



# 目录

## 一、 课题背景

- 低温晶体量热器
- CUPID-CJPL实验
- 振动解耦的重要性

## 二、 减振系统设计

- 减振系统设计
- 振动测量方法

## 三、 减振效果检验

- 振动测试结果
- 量热器读出信号

## 四、 总结

- 现阶段总结
- 后续改进计划

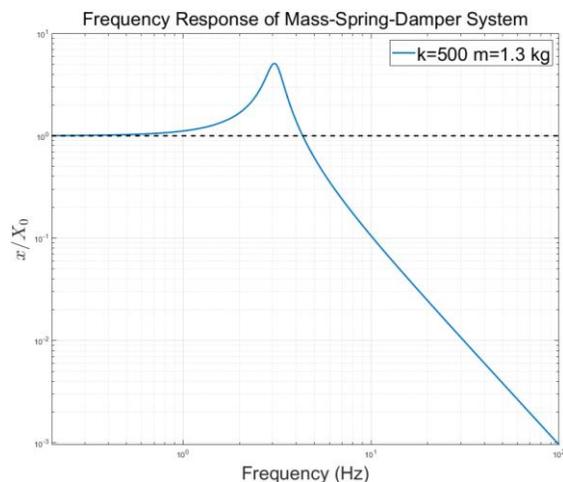
## 弹簧-阻尼系统

对于弹簧-阻尼系统，其对振动的传递函数如下

$$\frac{x}{X_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2 + (2\beta \frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2}}$$

其中，

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$



对USTC的低温晶体量热器平台进行振动解耦的设计

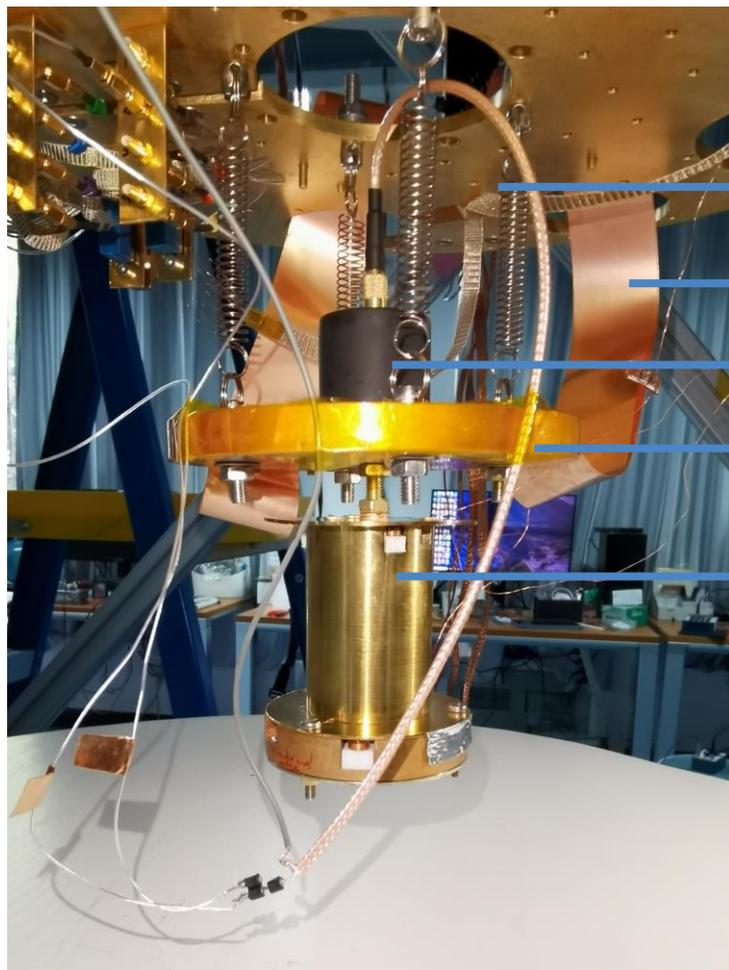
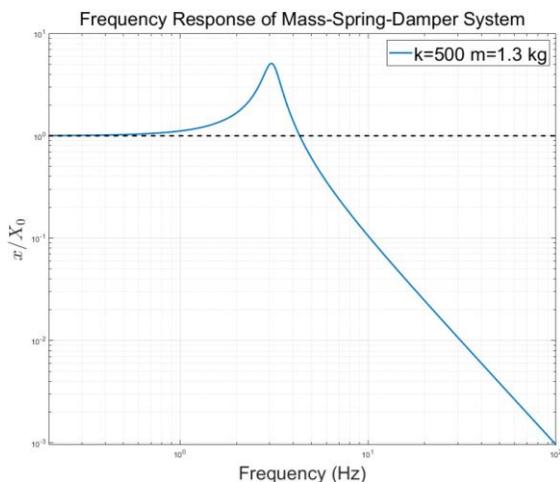
## 弹簧-阻尼系统

对于弹簧-阻尼系统，其对振动的传递函数如下

$$\frac{x}{X_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2 + (2\beta \frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2}}$$

其中，

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$



不锈钢弹簧×4  
 $k = 125 \text{ N/m}$

导热铜带  
PCB 393B04

振动探测器

减振平台

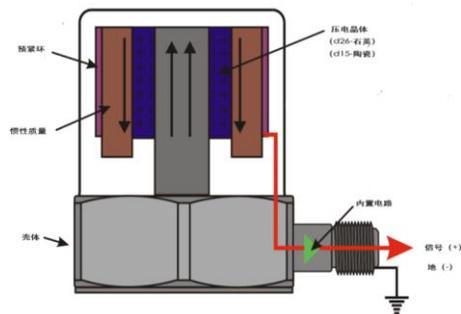
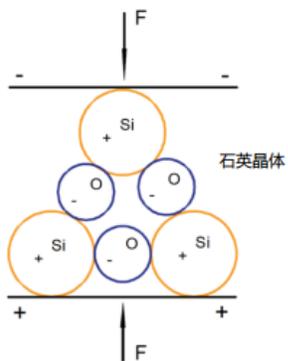
钼酸镉晶体量  
热器 (CMO)

$m = 1.3 \text{ kg}$

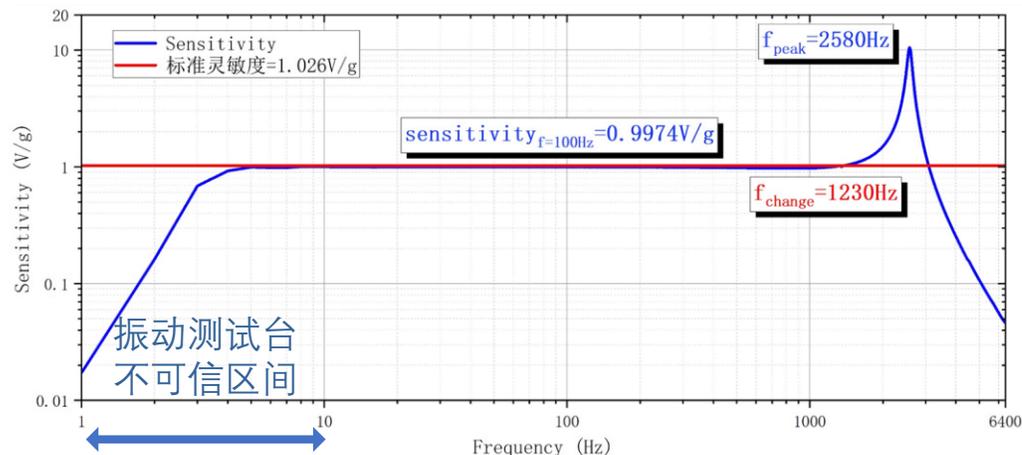
对USTC的低温晶体量热器  
平台进行振动解耦的设计



PCB 393B04  
振动探测器



## 探测器频率响应



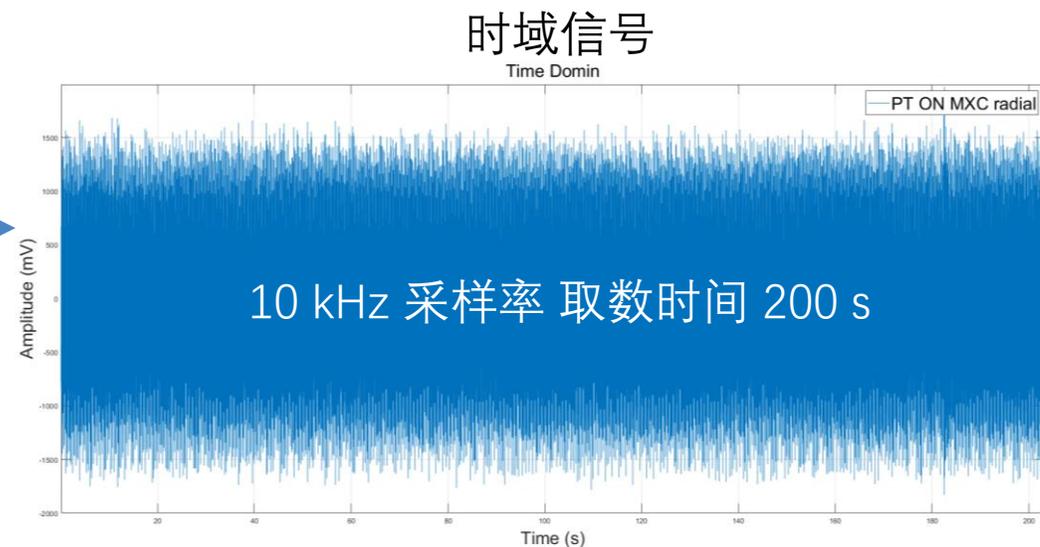
Frequency (Hz)	0.5	1	10	30	100	300	450
Dev (%)	3.7	3.2	1.7	1.0	1.0	-1.6	-2.7

——官方校准数据

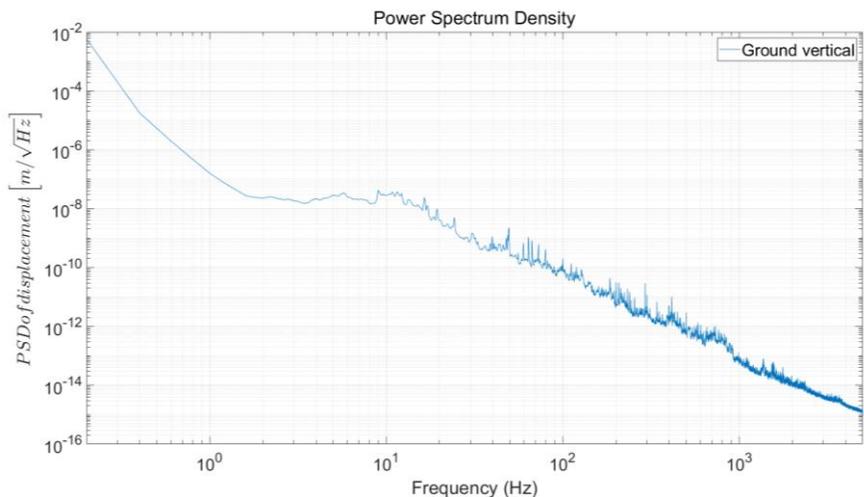
压电晶体：外力作用→产生一恒电荷源( $\Delta q \sim F$ )

利用惯性质量m:  $\Delta q \sim F = ma$

官方校准手册，与振动台测试频响，表明在1-450 Hz 拥有很好的线性

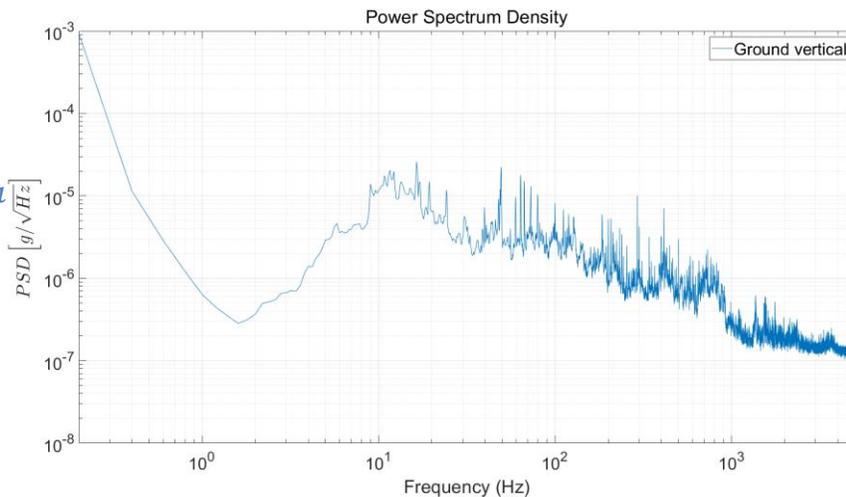


快速傅里叶变换



位移功率密度谱 (PSD<sub>d</sub>)

$$PSD_d = \frac{g}{(2\pi \times f_i)^2} \cdot PSD_a$$



加速度功率密度谱 (PSD<sub>a</sub>)

进而对频率分布信息以及位移RMS进行分析，评估减震效果



# 目录

## 一、 课题背景

- 低温晶体量热器
- CUPID-CJPL实验
- 振动解耦的重要性

## 二、 减振系统设计

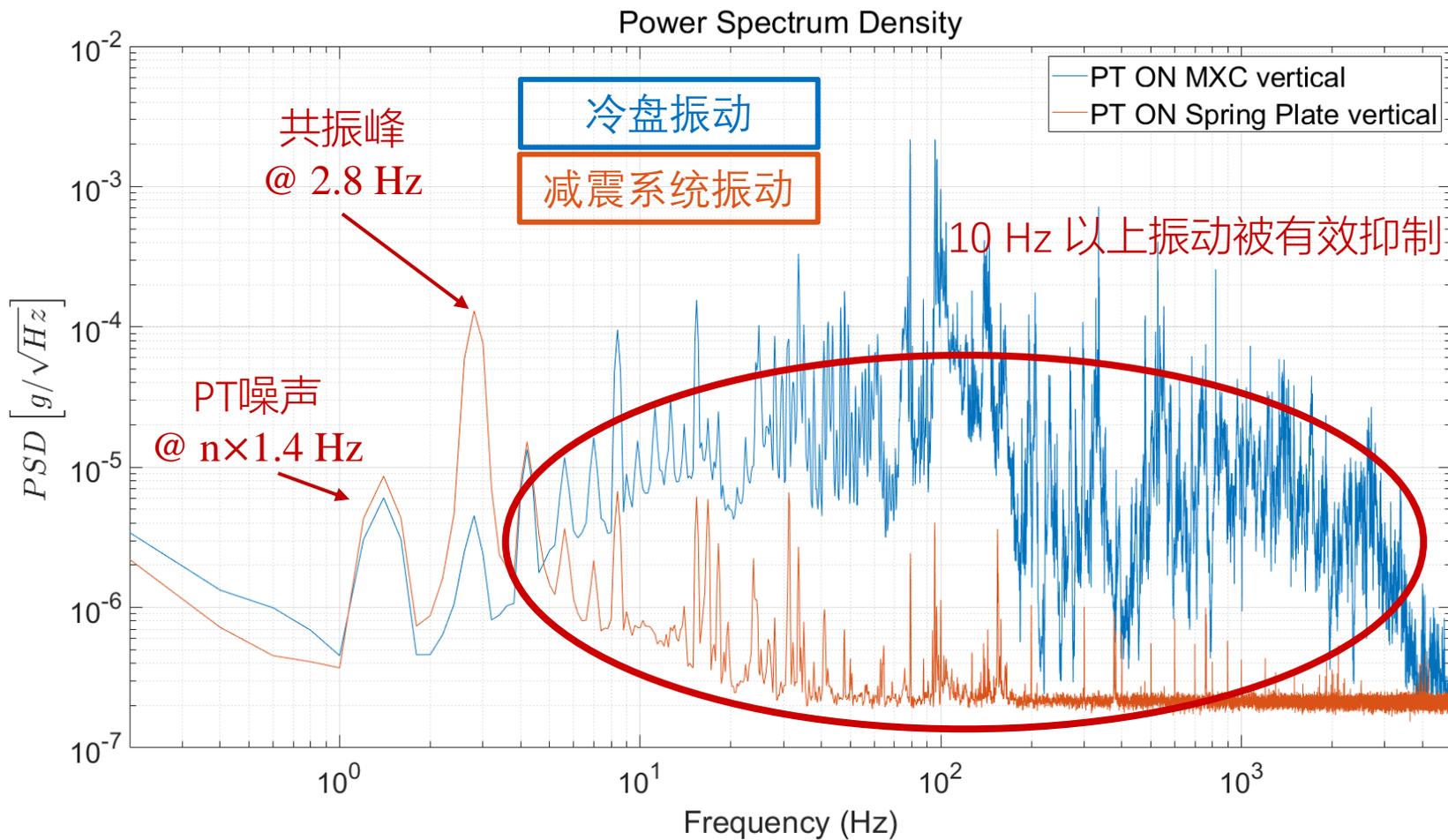
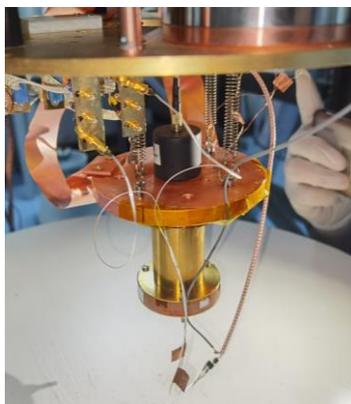
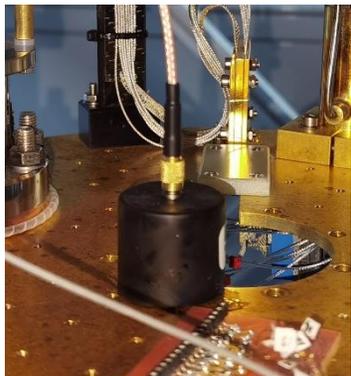
- 减振系统设计
- 振动测量方法

## 三、 减振效果检验

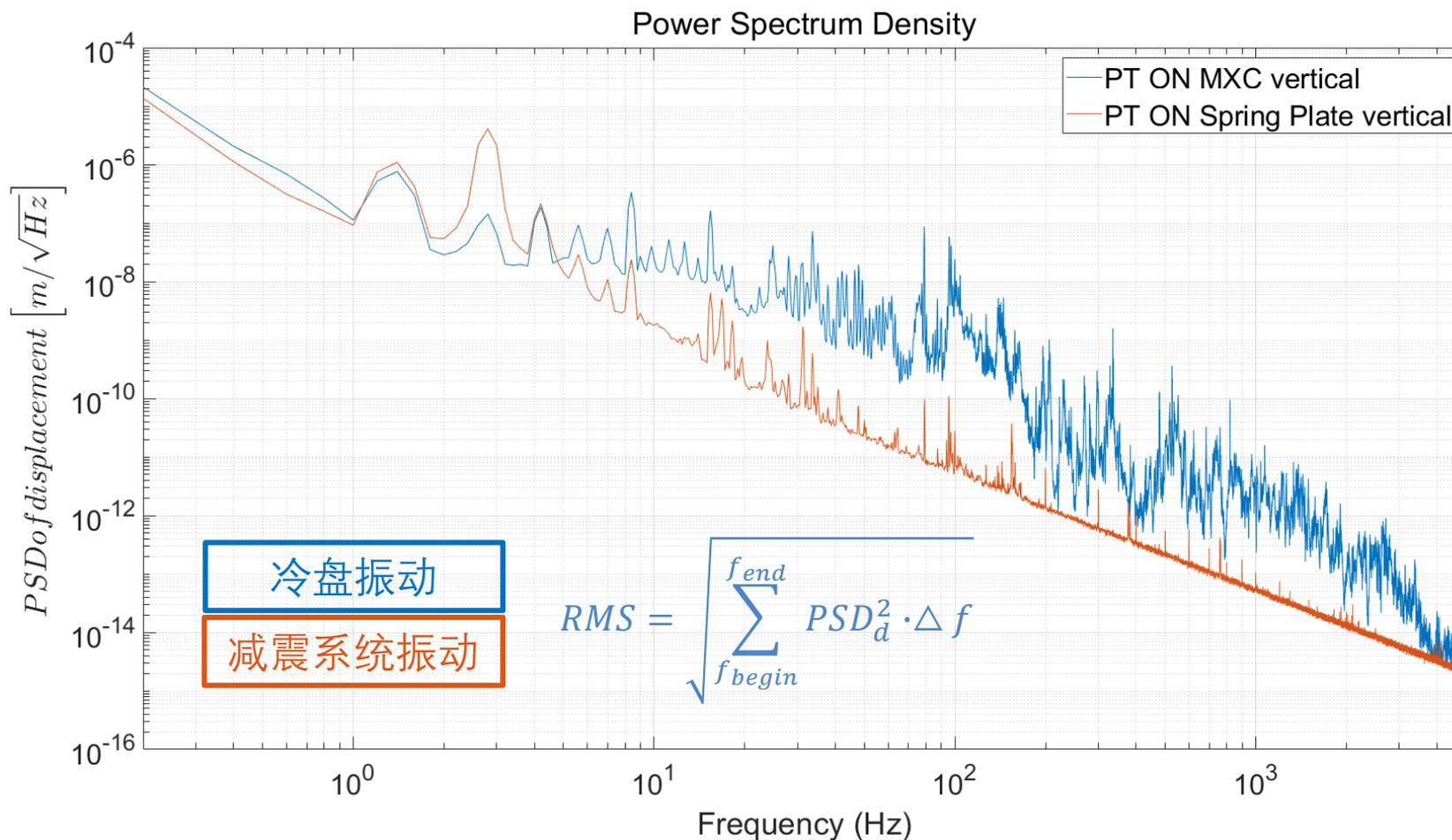
- 振动测试结果
- 量热器读出信号

## 四、 总结

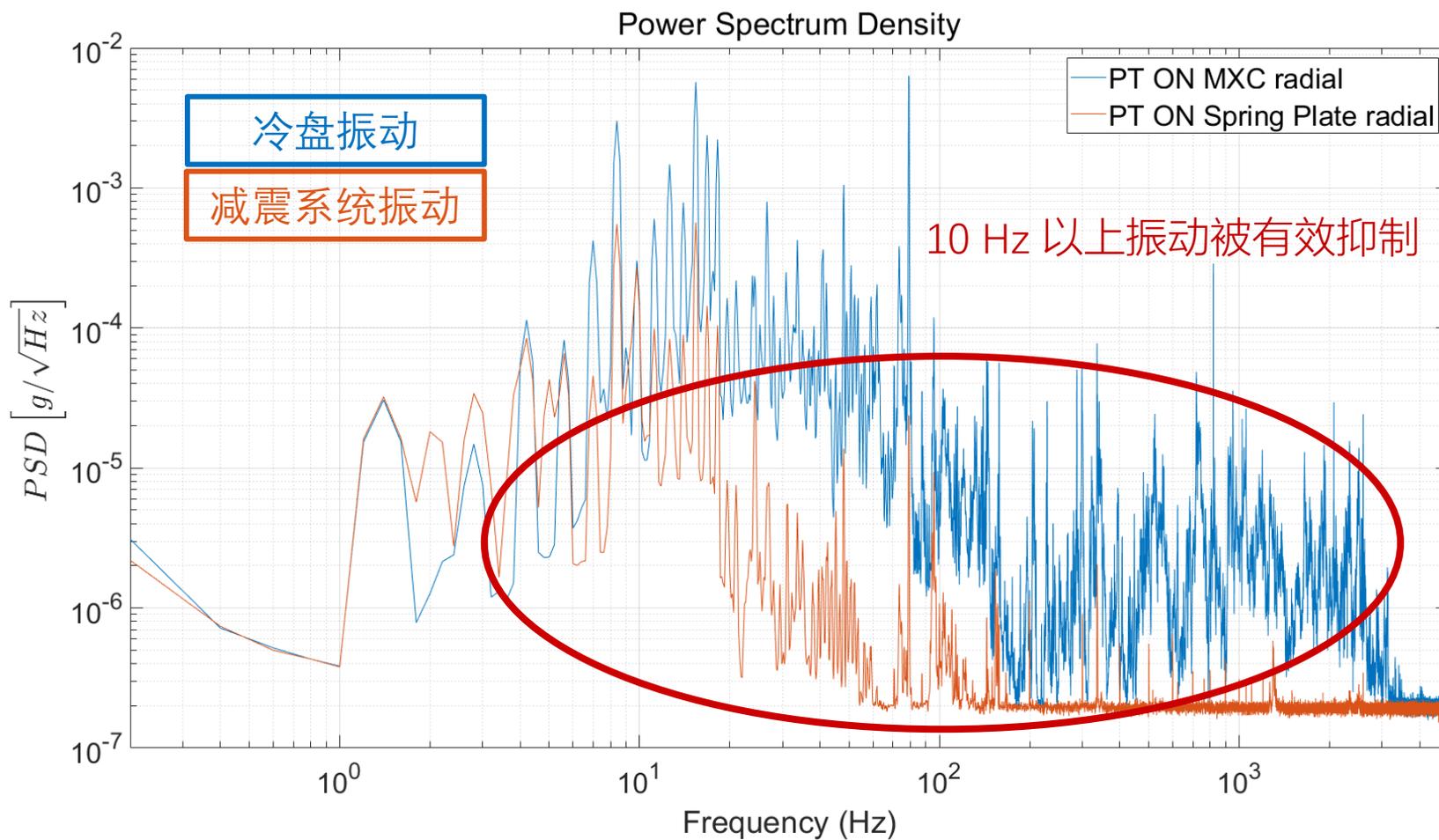
- 现阶段总结
- 后续改进计划



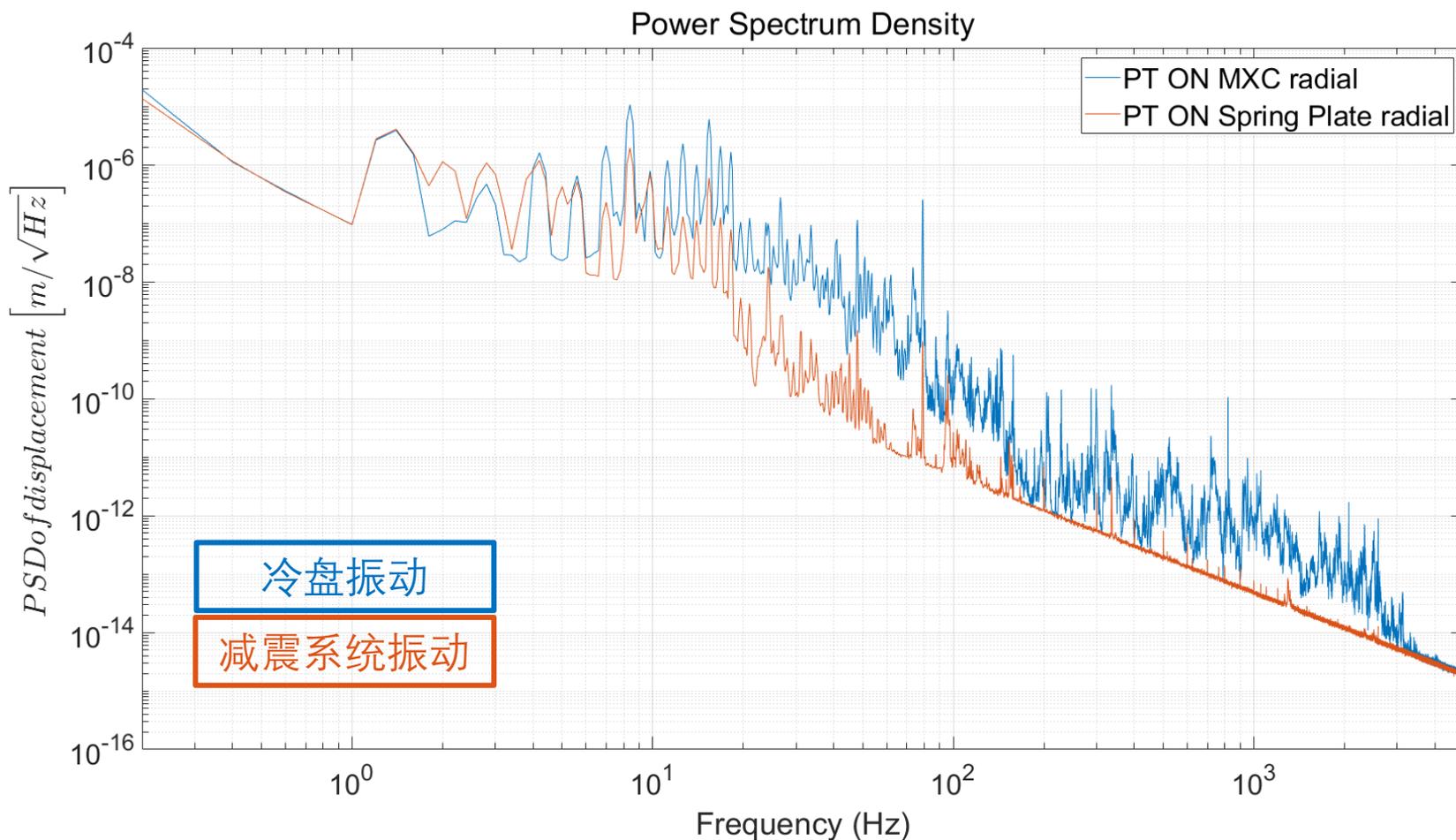
加速度功率密度谱



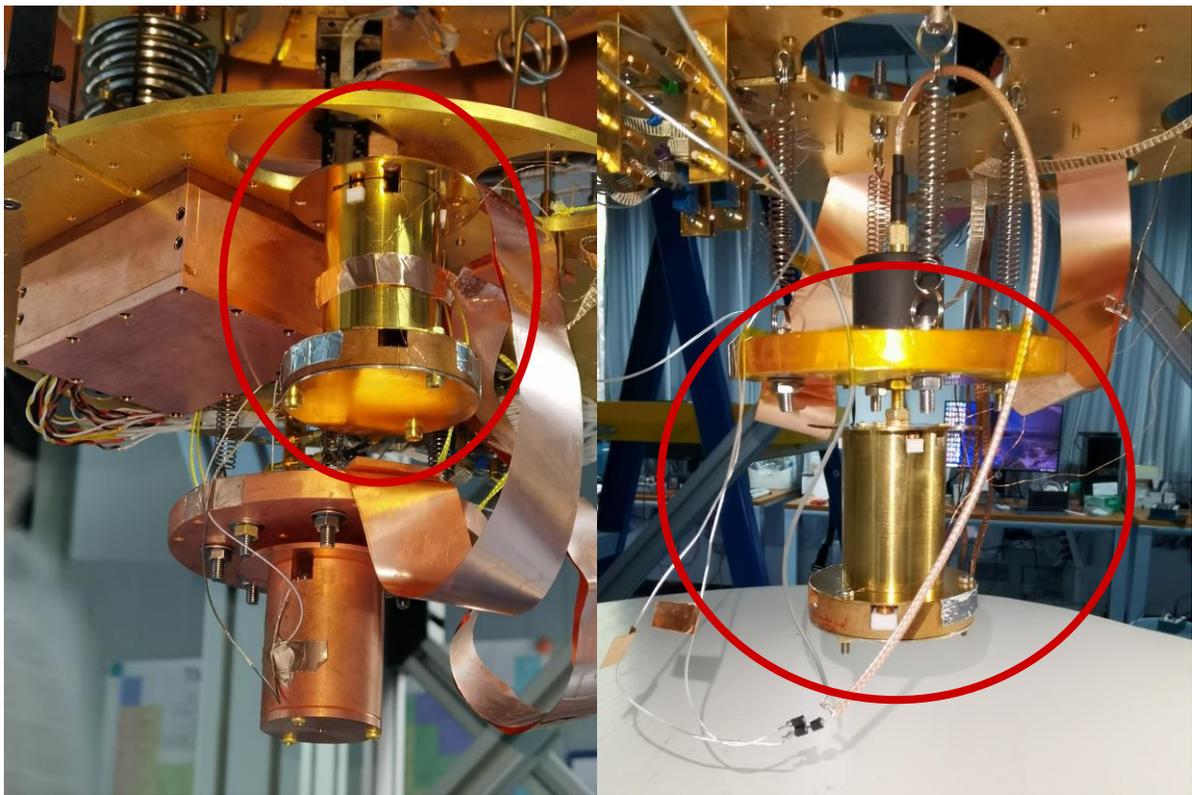
RMS对比	RMS	
	REG1(1-40 Hz)	REG2(40-2500 Hz)
冷盘振动	0.516 $\mu\text{m}$	75.7 nm
减振系统振动	2.37 $\mu\text{m}$	0.204 nm
变化百分比	+359.3%	-99.73%



加速度功率密度谱



RMS对比	RMS/m	
	REG1(1-40 Hz)	REG2(40-2500 Hz)
冷盘振动	7.51 $\mu\text{m}$	183 nm
减振系统振动	2.88 $\mu\text{m}$	1.22 nm
变化百分比	-61.65%	-99.33%

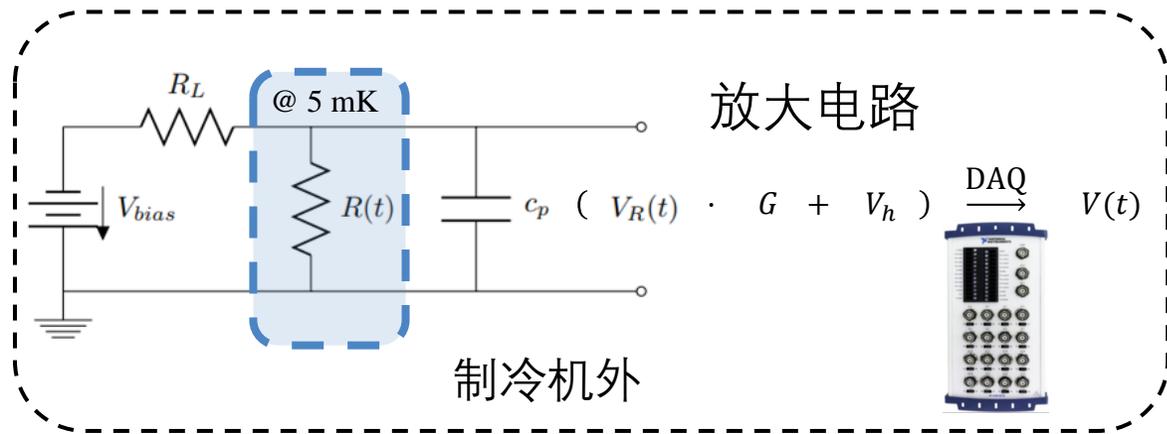


CMO直接固定在冷盘

以及固定在减震系统上

分别进行测量

## 读出系统



工作温度 5 mK

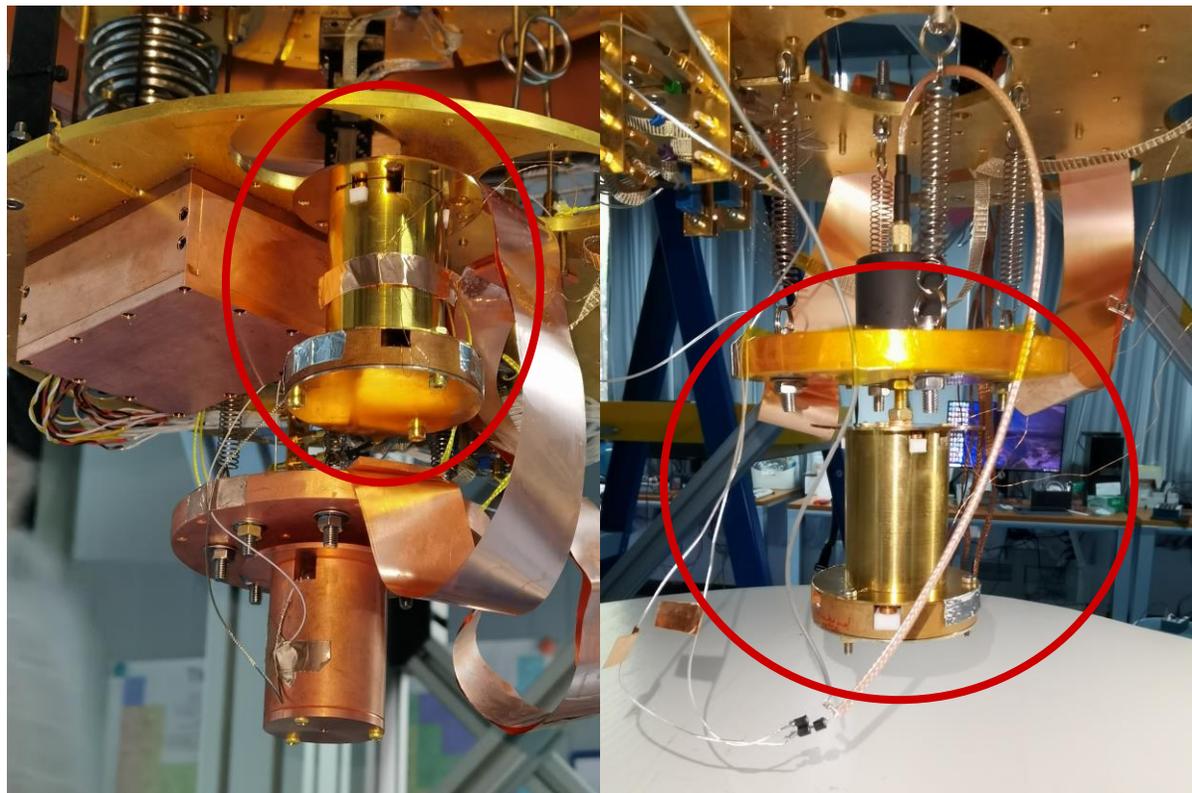
负载电阻 $R_L$ : 200 M $\Omega$

偏压 $V_{bias}$ : 0.5 V

输出增益: 1700



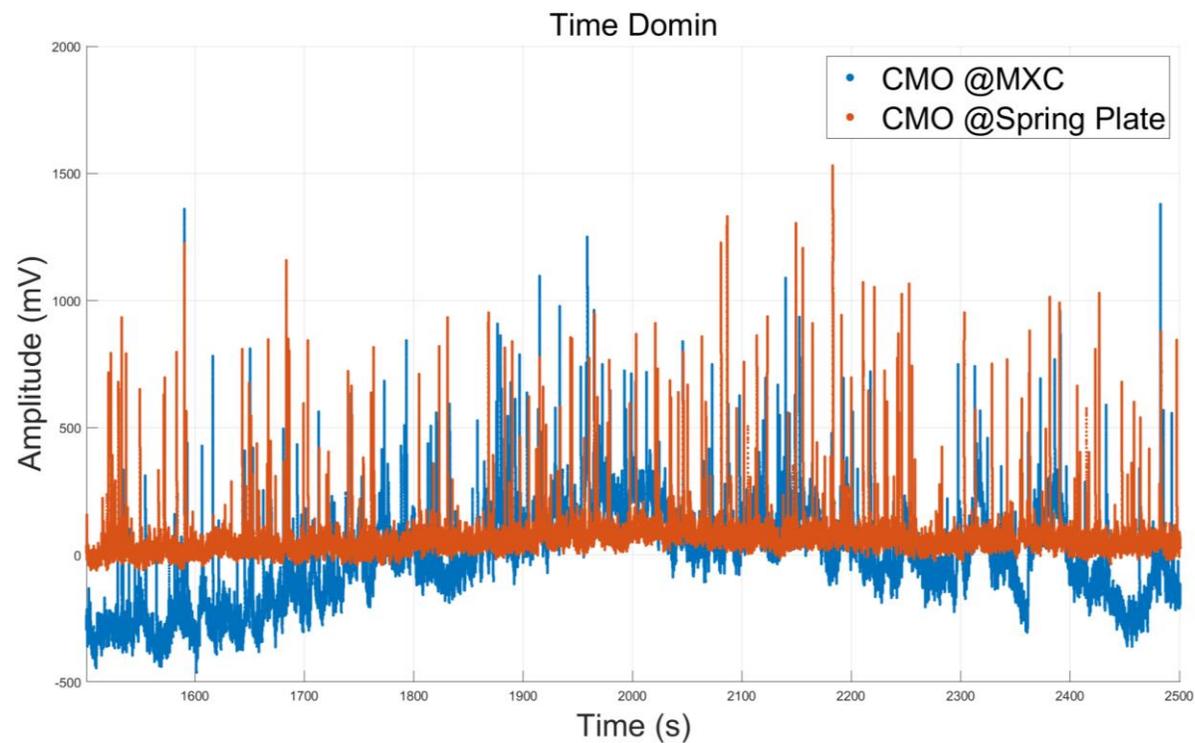
采样率 5 kHz, 分别取数 1 h



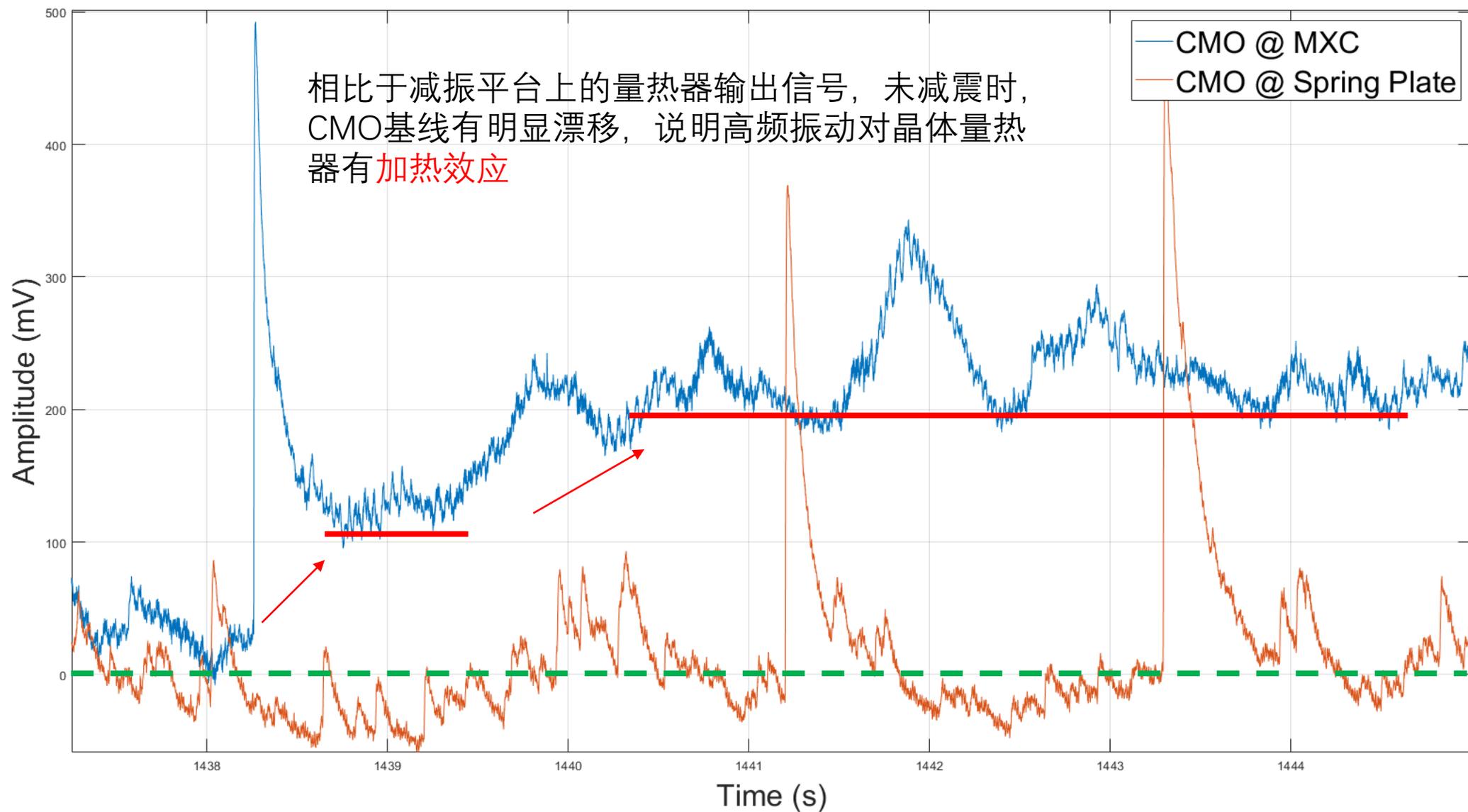
CMO直接固定在冷盘

以及固定在减震系统上

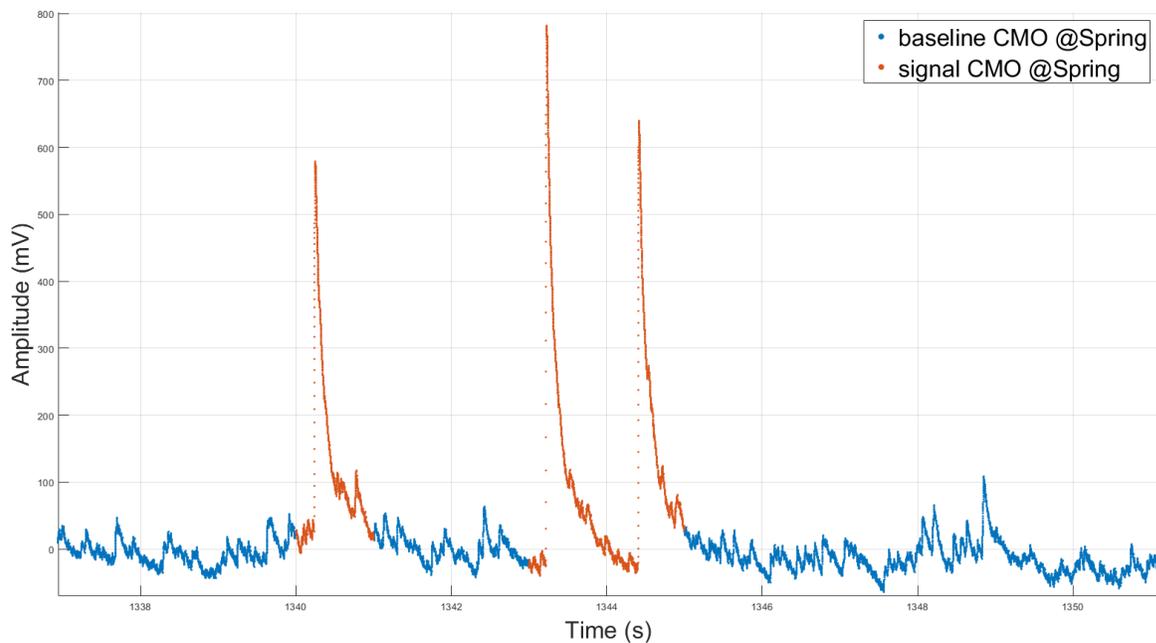
分别进行测量



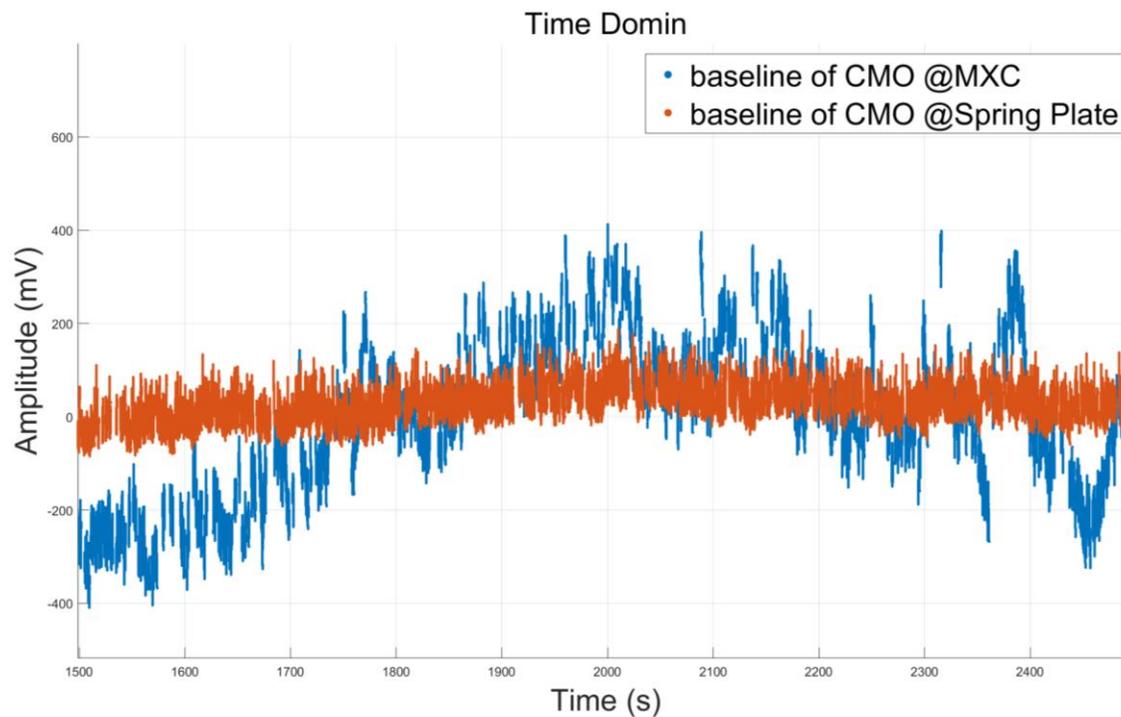
CMO信号读出对比



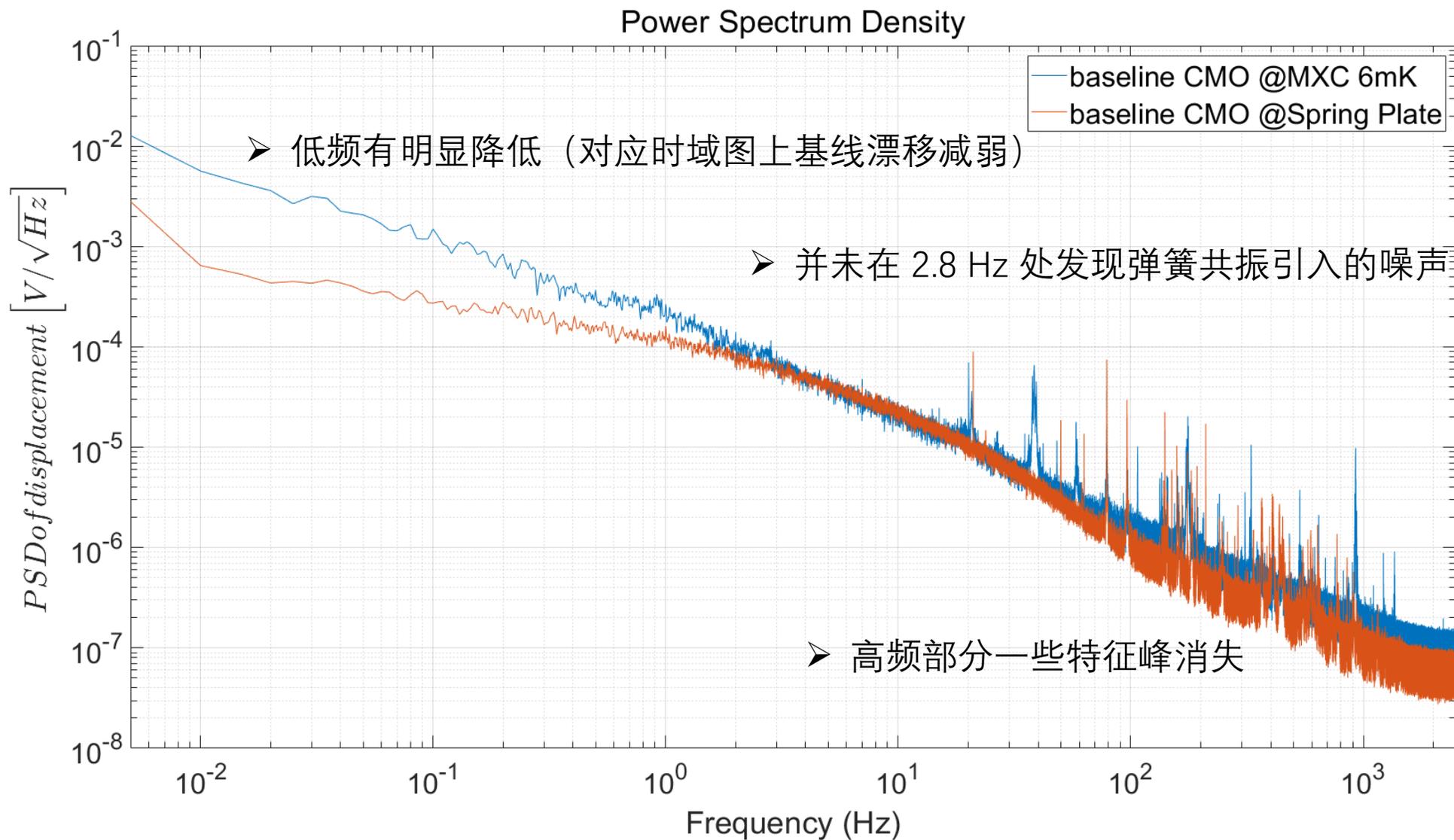
➤ 剔除探测器信号，对基线部分进行分析



探测器读出的基线漂移情况有明显改善，  
基线RMS降低



CMO	冷盘上读出	减震系统上读出	变化
基线RMS (mV)	161.75 mV	36.801 mV	-77.25%



读出信号功率密度谱



# 目录

## 一、 课题背景

- 低温晶体量热器
- CUPID-CJPL实验
- 振动解耦的重要性

## 二、 减振系统设计

- 减振系统设计
- 振动测量方法

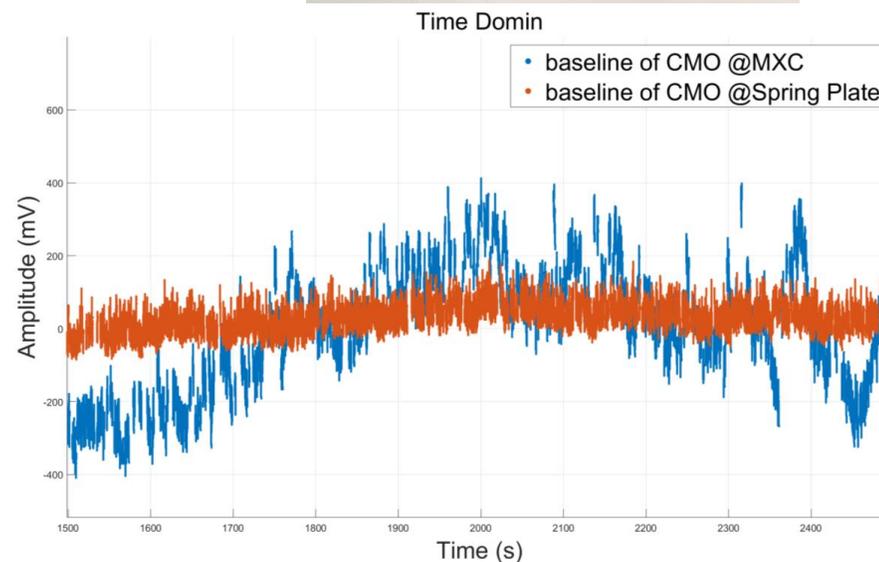
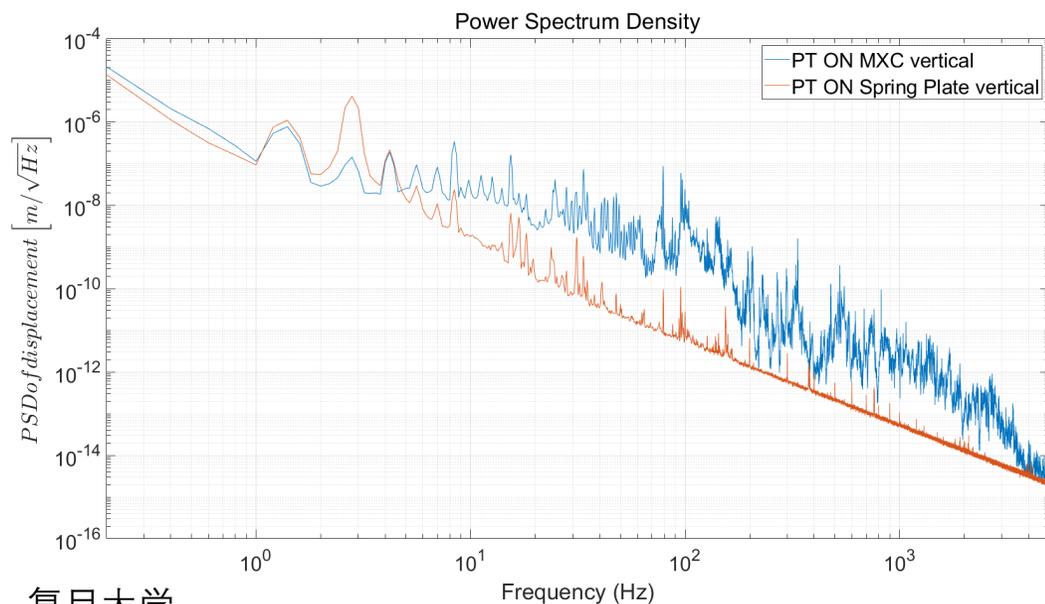
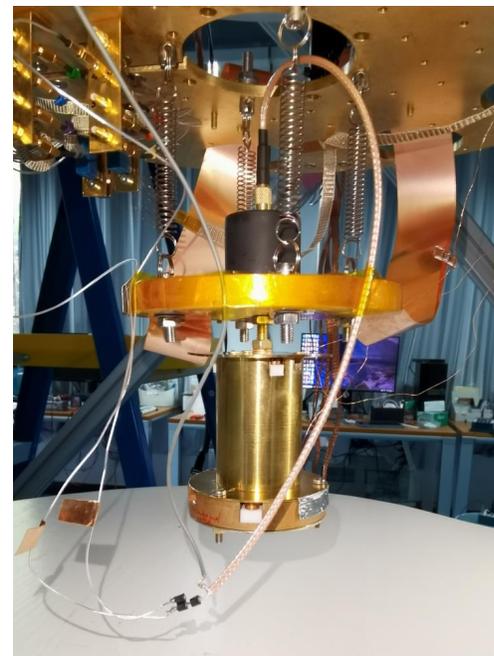
## 三、 减振效果检验

- 振动测试结果
- 量热器读出信号

## 四、 总结

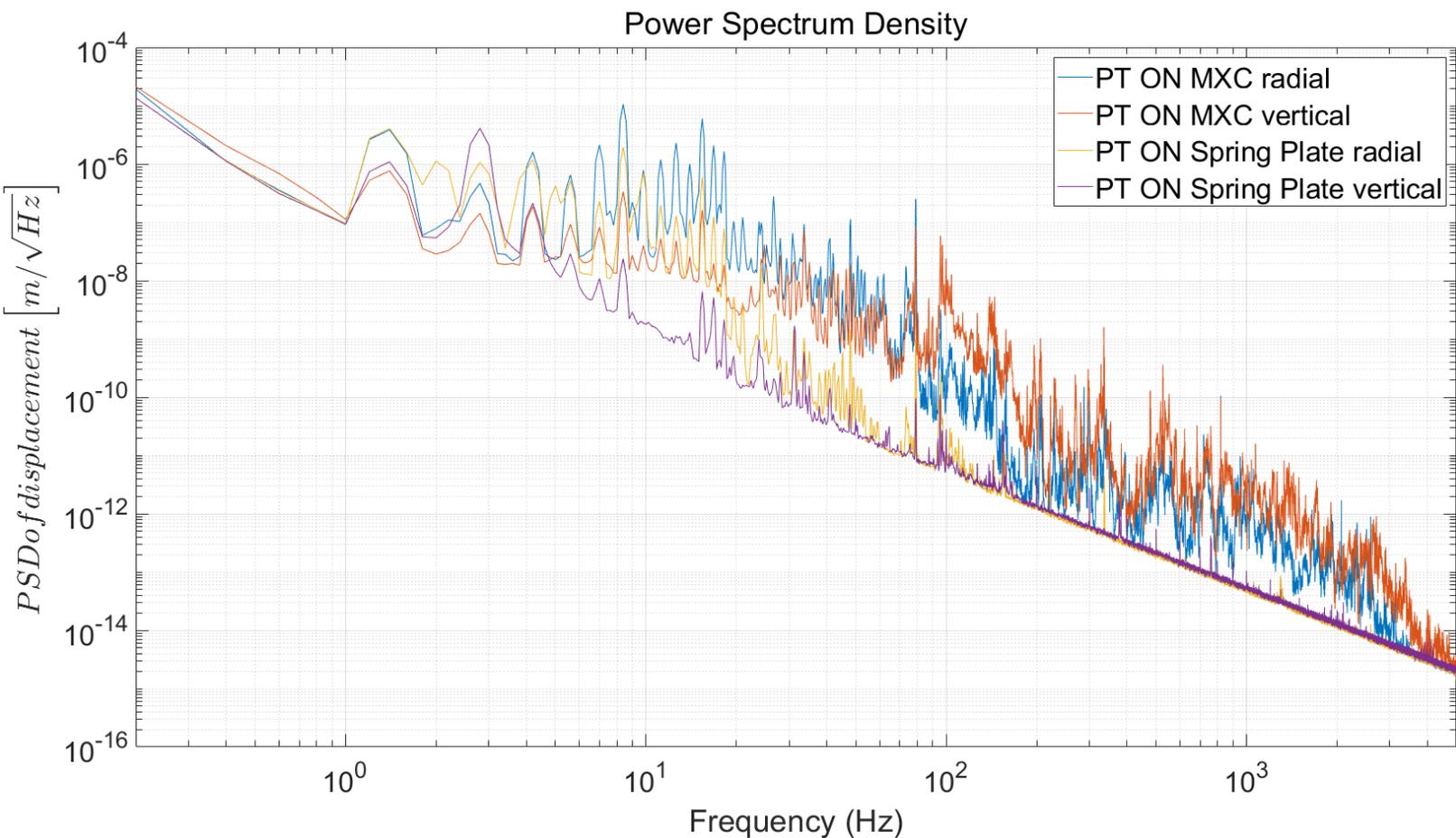
- 现阶段总结
- 后续改进计划

- 利用弹簧-阻尼系统进行了减振结构的设计
- 利用振动探测器，在振动的功率密度谱上，评估减振效果
  - 高频振动得到明显改善
- 分析低温晶体量热器的读出信号，在减振前后基线的变化，验证减振效果
  - 量热器读出基线稳定，基线低频噪声得到抑制



➤ 重点提高水平方向的减振能力（更长的有效长度）

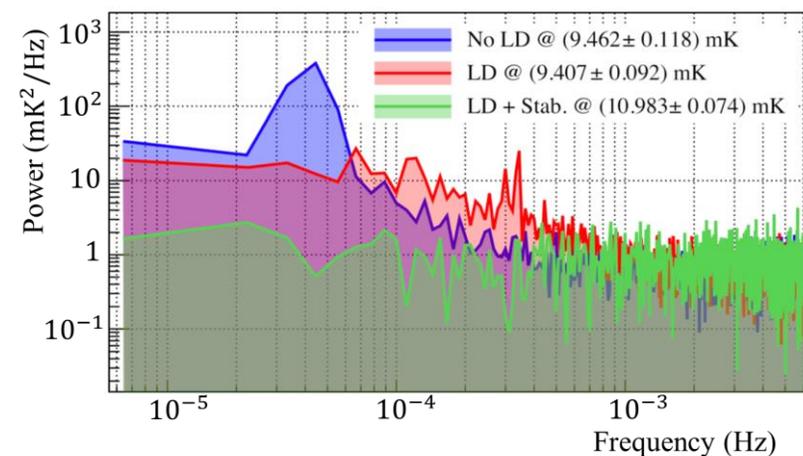
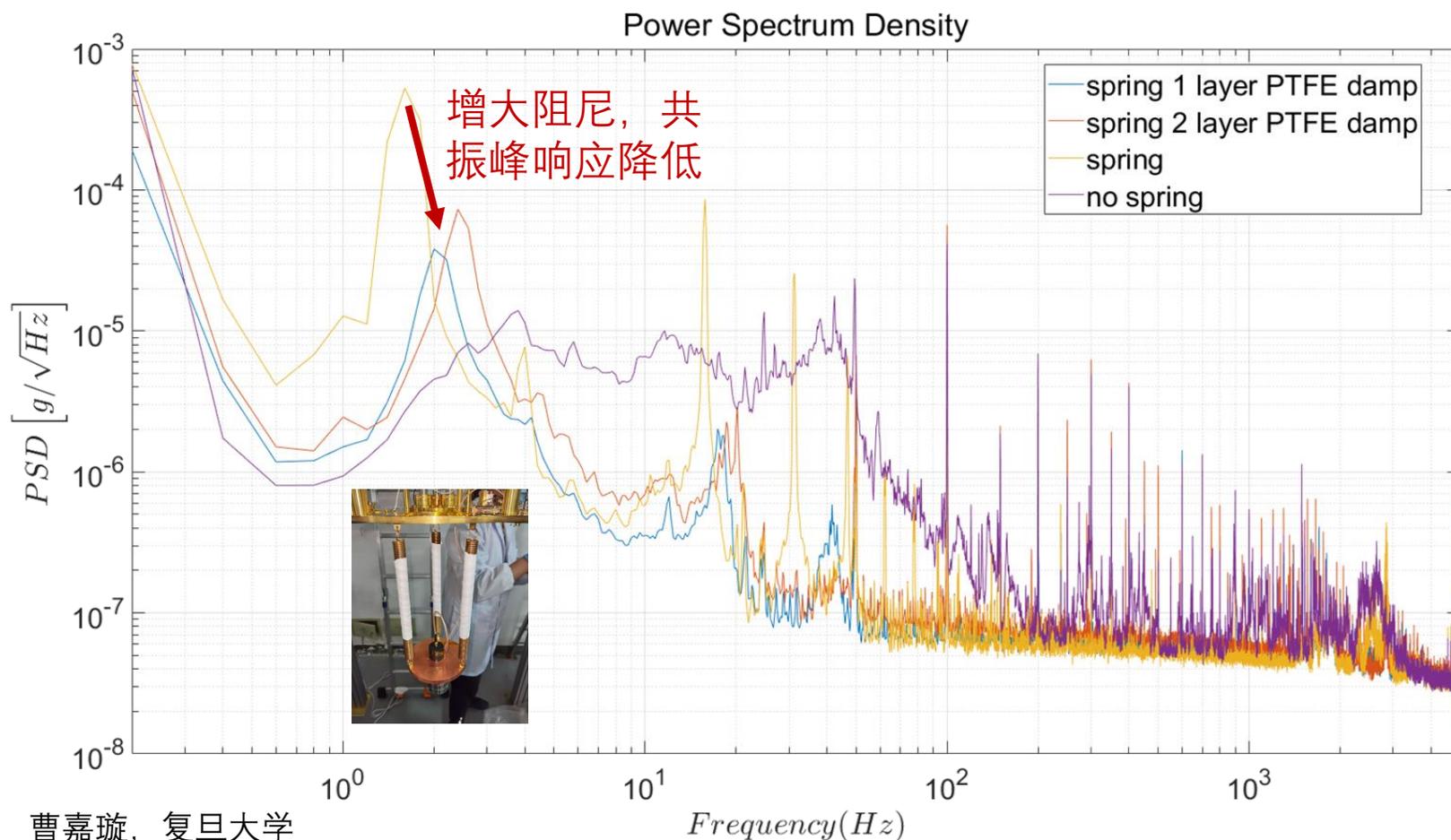
——不过受限于制冷机底部空间，也需要进一步取舍



RMS (REG1)	垂直方向	水平方向
冷盘震动	0.516 $\mu\text{m}$	7.51 $\mu\text{m}$
减震系统振动	2.37 $\mu\text{m}$	2.88 $\mu\text{m}$
RMS(REG2)	垂直方向	水平方向
冷盘震动	75.7 nm	183 nm
减震系统振动	0.204 nm	1.22 nm

可以看到，水平方向的振动普遍高于垂直方向

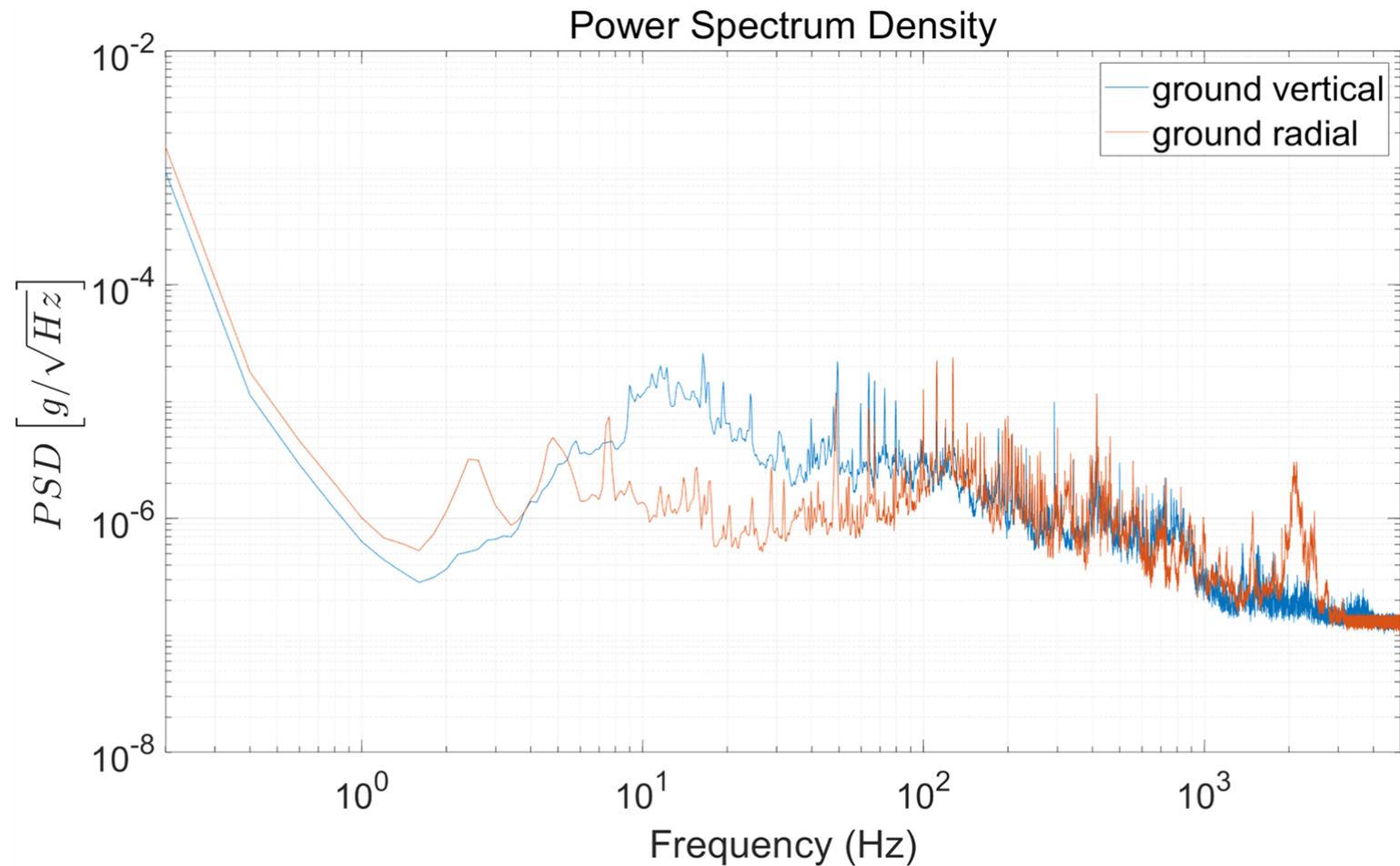
- 定制弹性系数更小的弹簧（降低轴向共振峰频率）
- 增加减震系统阻尼（减弱共振峰响应）
- 尝试PT相位相消，进行主动减震



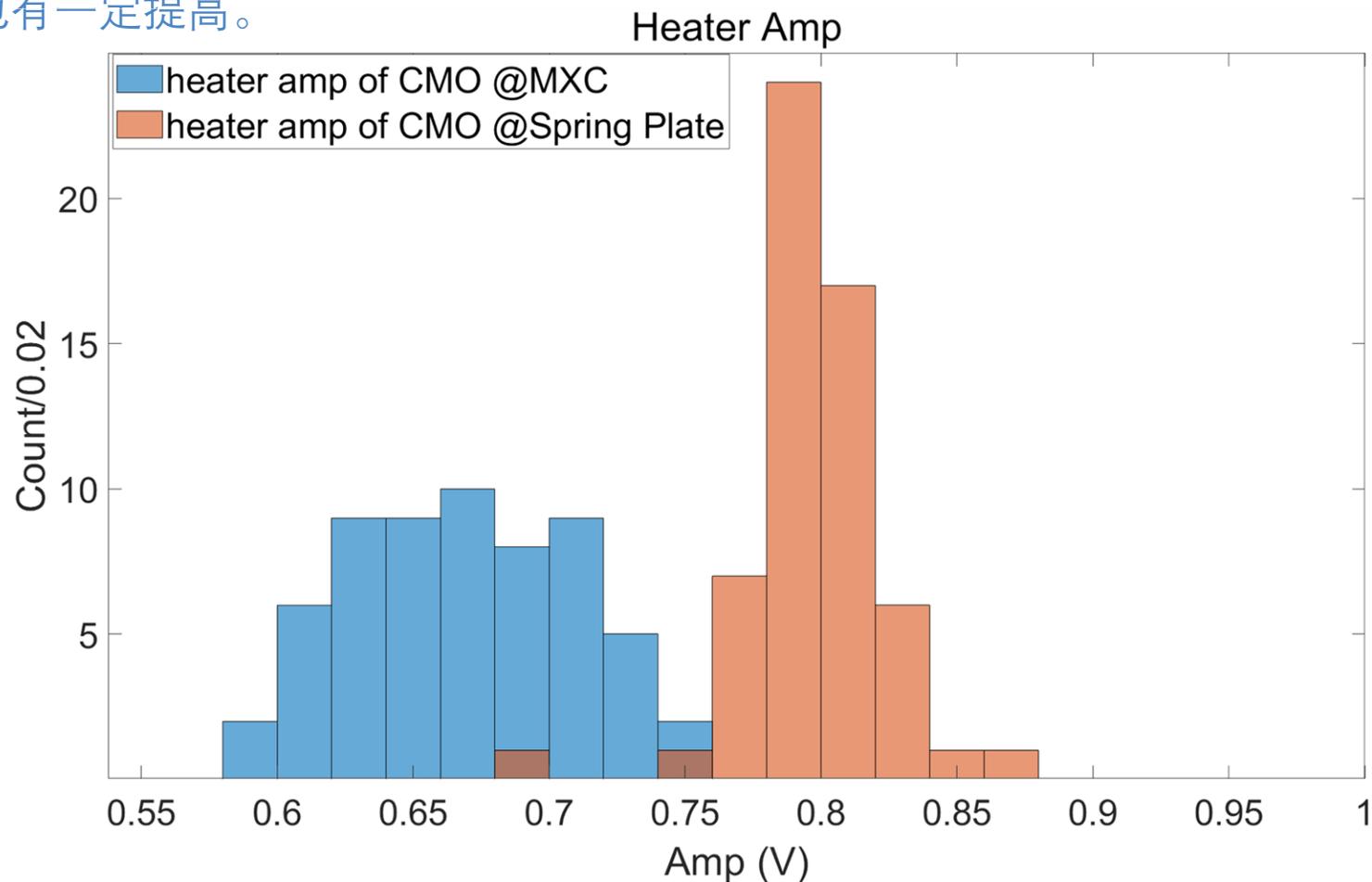
CUORE实验PT相位相消效果

Thanks

- 除了PT的振动噪声，地面的振动也是噪音来源之一
  - 未来进入锦屏后，水流等带来的地面振动也需要进一步测量和评估



- 在冷盘和减震系统上，同等偏压的heater信号幅度分布
  - 可以看到灵敏度以及能量分辨率也有一定提高。



加热电阻信号幅值分布图