



高能物理分会，2021.08.18

# 基于最佳滤波器方法的晶体量热器 读出数据预处理

赵康康

2021年8月18日

核探测与核电子学国家重点实验室  
中国科学技术大学 安徽 · 合肥



# 主要内容

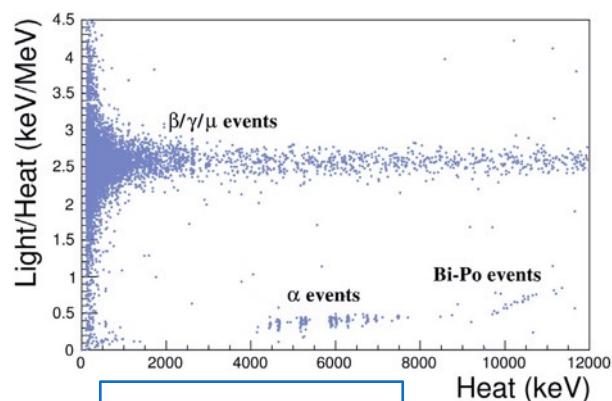
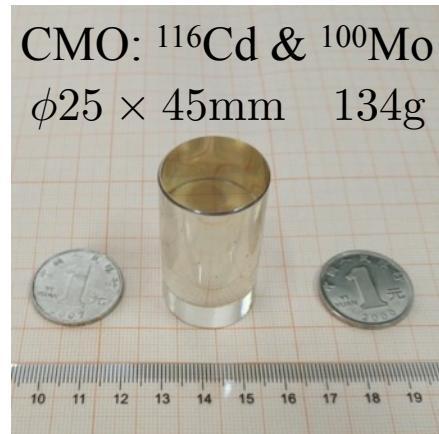
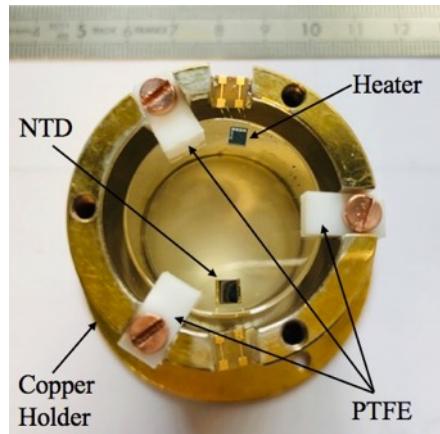
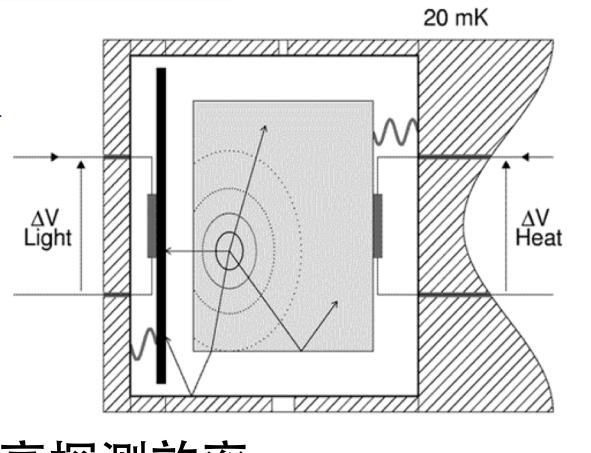
---

- 晶体量热器技术
- 晶体量热器读出信号
- 最佳滤波器
- 数据预处理
- 总结展望

# 晶体量热器技术

探测器核心组件: 吸收晶体, 热传感器, 热沉, 弱热连接

- 以声子为媒介子的极低温探测器
  - 低能量探测阈值  $T_0 \sim \text{mK}$   $w \approx \text{meV}$
  - 本征能量分辨 FWHM  $5.3\text{keV}@\text{2615keV}$
- 闪烁晶体: 光-热二维读出
  - 有效粒子鉴别:  $\alpha$  和  $\beta/\gamma$  事件
- 吸收体: 材料选择广泛, “源=探测器” 极高探测效率

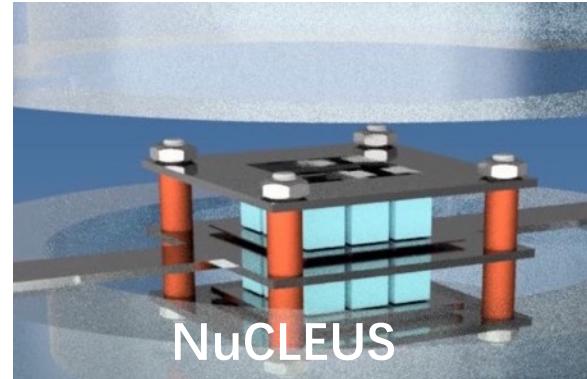
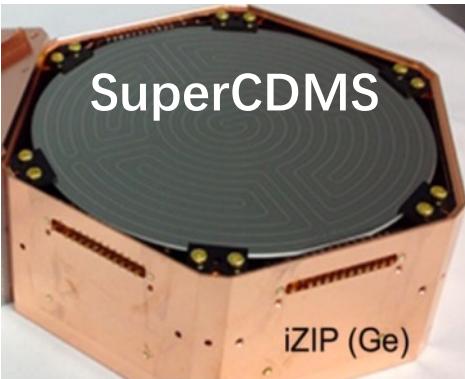


光热两维图

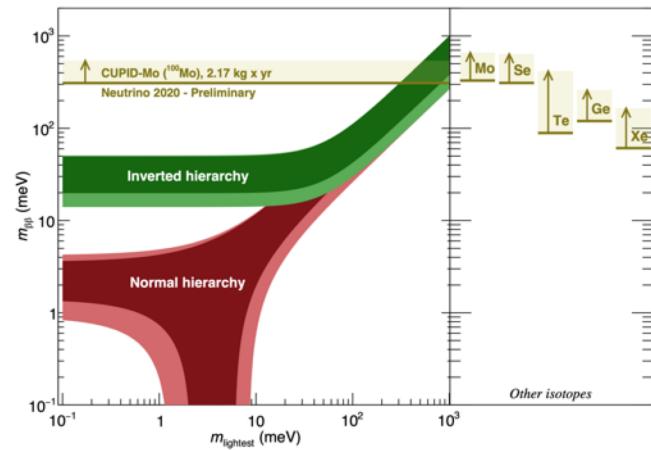
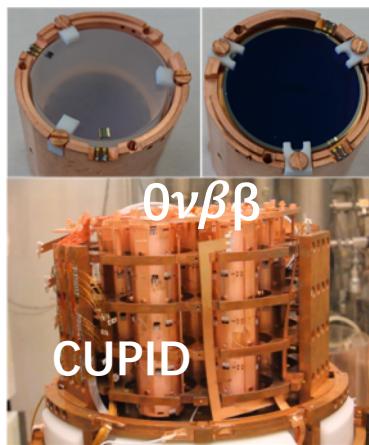
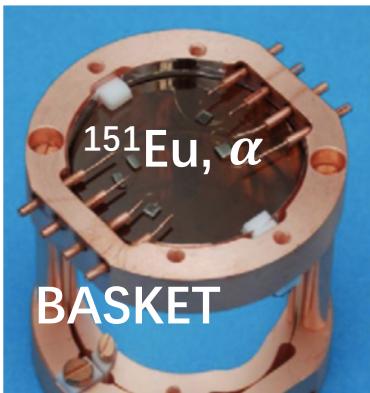
France CSNSM: 国产CMO晶体组建成闪烁晶体量热器, 并在25 mK下运行取数

# 晶体量热器应用

- **应用** 天文学、粒子物理与原子核物理、原子物理学、量子技术新前沿等
- ✓ 暗物质粒子寻找
- ✓ 中微子弹性相干散射



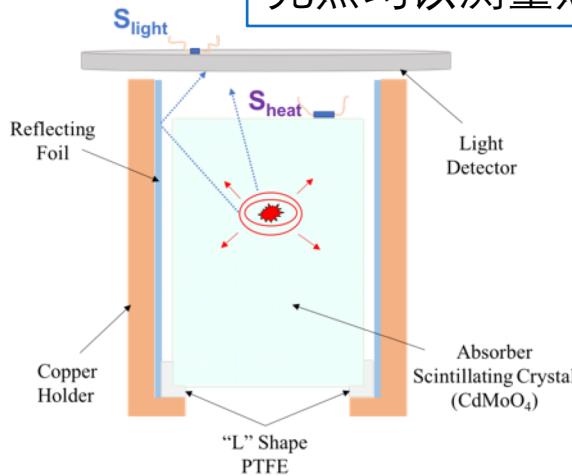
- ✓ 稀有核衰变



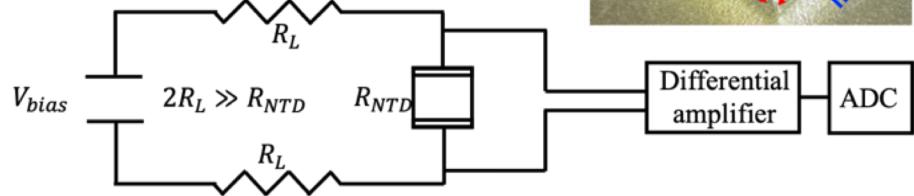
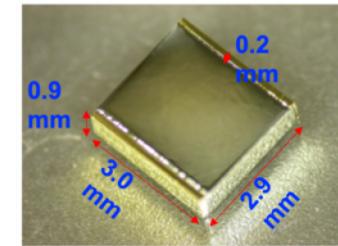
国内晶体生产、核素富集，锦屏山地下实验室等优势，发展低温量热器技术

# 晶体量热器读出信号

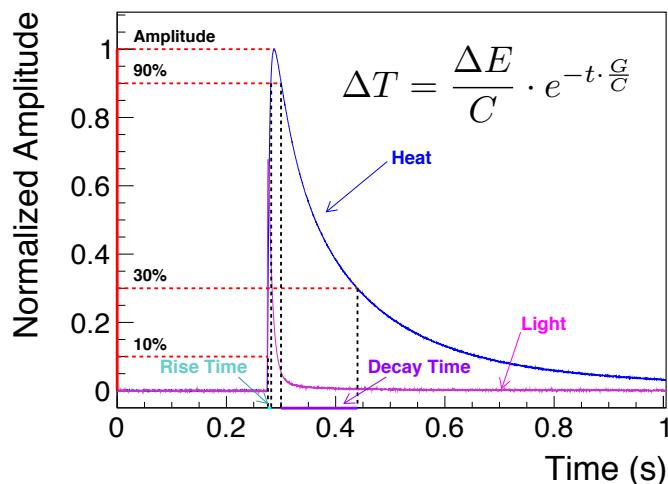
光热均以测量热的形式读出



$$R = R_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\alpha}$$



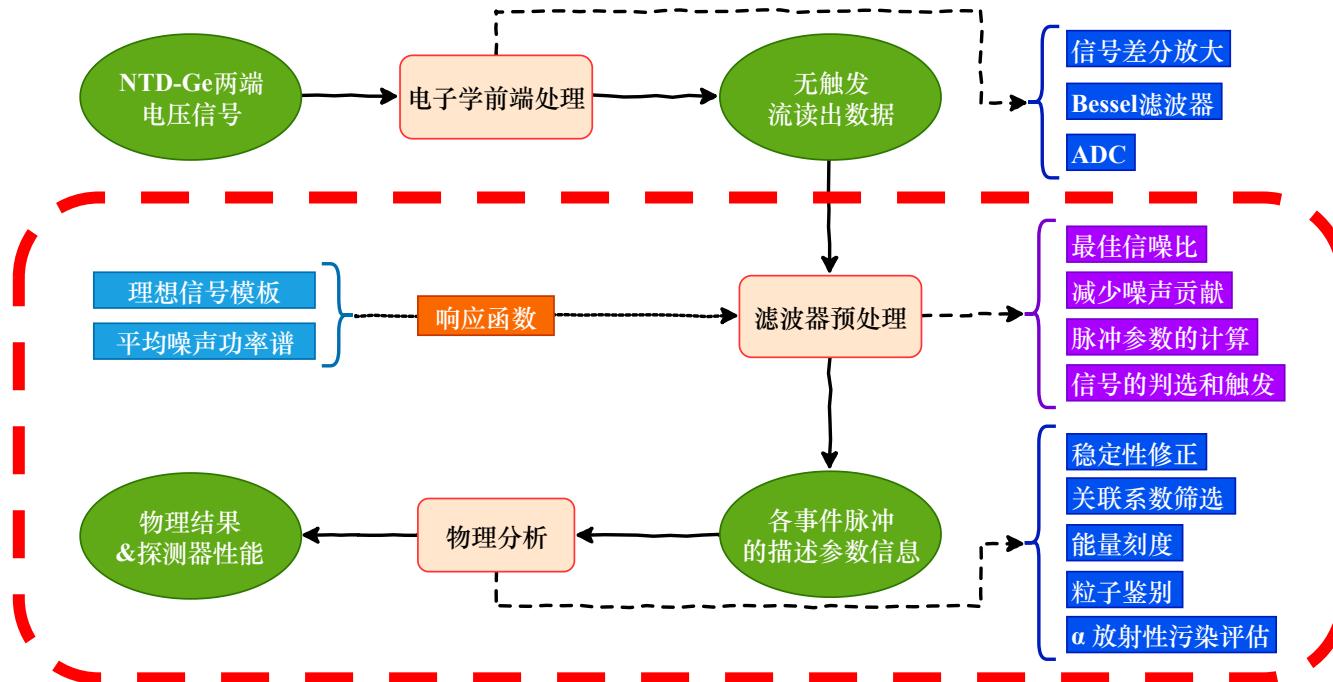
NTD-Ge热传感器信号读出的偏置电路图



$$v(t) = A \cdot s(t - t_0) + n(t) + B$$

- 10 kHz 采样频率无触发流读出
- 探测器脉冲波形响应  $s(t)$  均一
- 基线平  $B$  反映热沉温度，稳定性
- 上升沿~6 ms，下降沿~140 ms
- 幅值  $A$  正比于能量

# 晶体量热器数据预处理



## • Off-line 数据预处理：

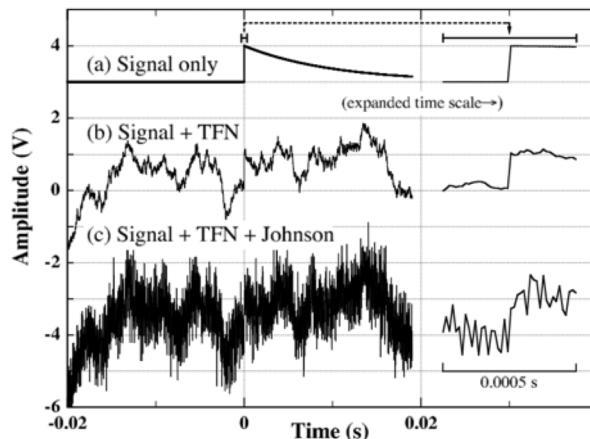
- 准确估计幅值A，减小噪声贡献
  - 从流数据中触发信号，提取事例
  - 计算事例信息
- 最佳滤波器处理
  - 触发算法
  - 构造波形参数

# 晶体量热器噪声来源

- 热动力涨落噪声(Thermodynamic Fluctuation Noise)
  - 工作在热平衡状态的探测器，内能存在热涨落

$$E_{\text{internal}} = \frac{C \cdot T}{k_B T} \cdot k_B T \implies \langle E \rangle = \sqrt{k_B T^2 C}$$

- 热敏电阻约翰逊噪声(Thermometer Johnson Noise)
- 负载电阻约翰逊噪声(Load Resistor Johnson Noise)
  - 电阻中电子布朗运动所引起的噪声



无法减小消除！

Cite: McCammon D. Thermal equilibrium calorimeters—an introduction[J]. Cryogenic particle detection, 2005: 1-34.

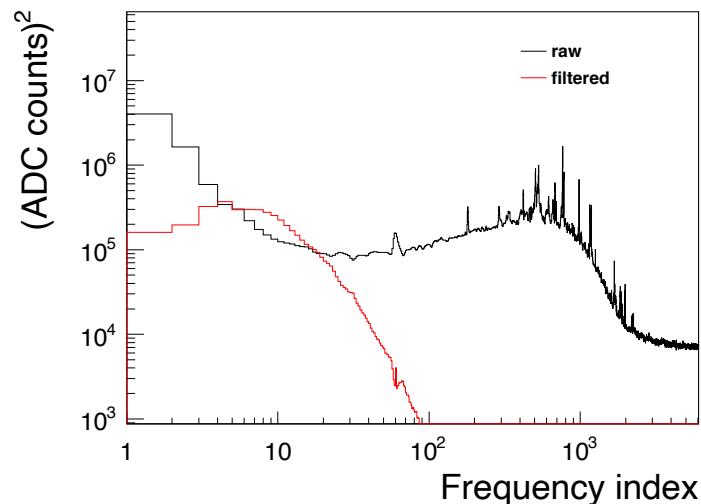
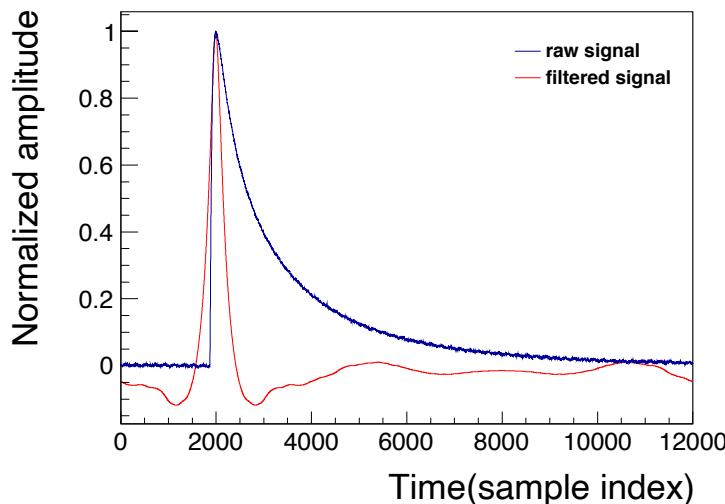
# 应用最佳滤波器

- Gatti-Manfredi 最佳滤波器: 滤波后峰值时刻 $\tau_M$ 的信噪比达到最大

$$v_{1\text{filtered}}(t) = \frac{A}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(\omega) \cdot H(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

$$H(\omega) = K' \frac{S_1^*(\omega)}{\mathcal{N}(\omega)} e^{-j\omega\tau_M}$$

- 响应函数: 从原始数据中获取信号模板和平均噪声功率谱
- 滤波后频谱: 信号大的带宽内增强, 噪声大的带宽内压制



- 滤波后平均噪声功率从2.09 ADC (19.8 keV) 降至 0.26 ADC (2.5 keV)

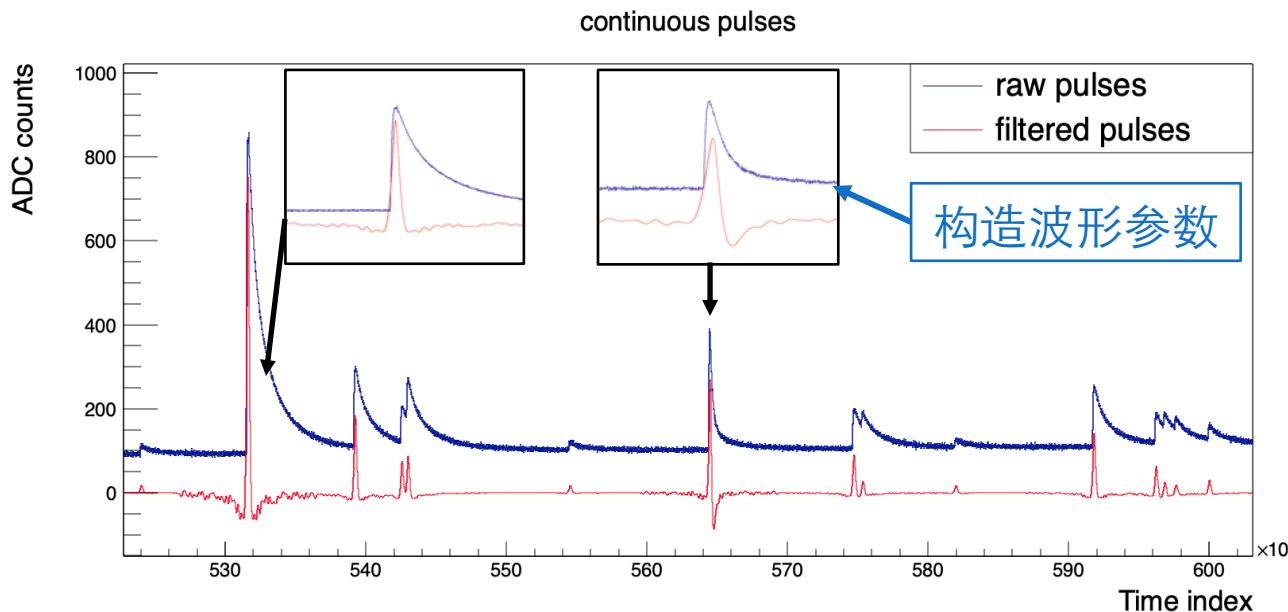
# 最佳濾波器處理

- 时间对齐：自相关函数和互相关函数

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t - \tau)dt$$

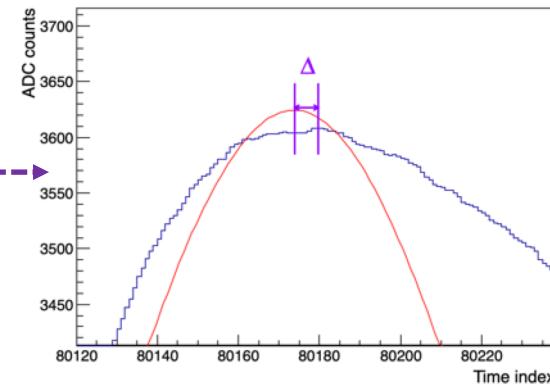
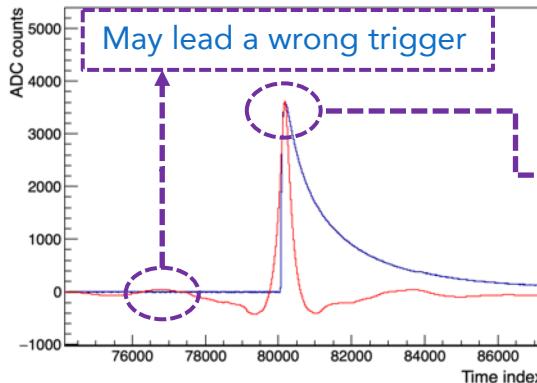
$$(x * y)(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(\tau - t)dt$$

- 濾波后的第一个频率成分为零确保濾波后基线为零
- 连续流数据濾波处理 [REF : doi : 10.1088/1748-0221/6/02/P02007](https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/02/P02007)



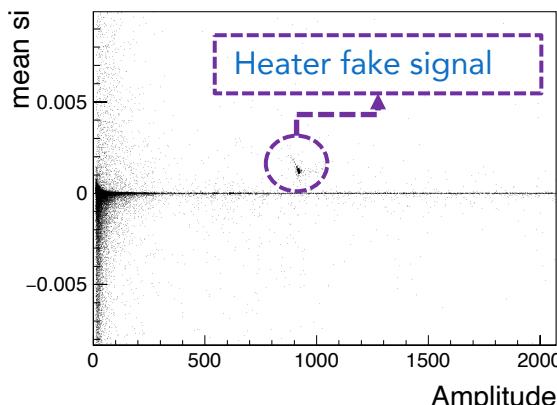
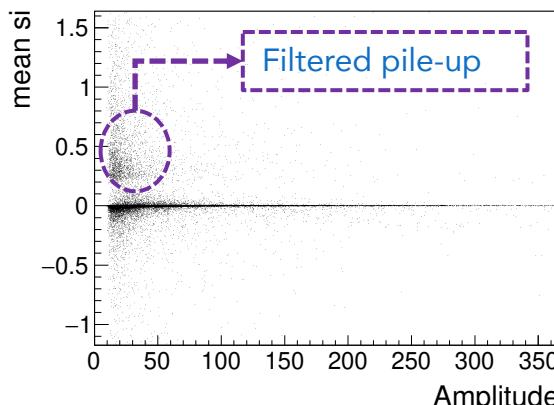
# 触发及事例参数

- 触发方式：滤波前后峰位偏移量 $\Delta$ 小于100 bins
- 错误触发：容易去掉

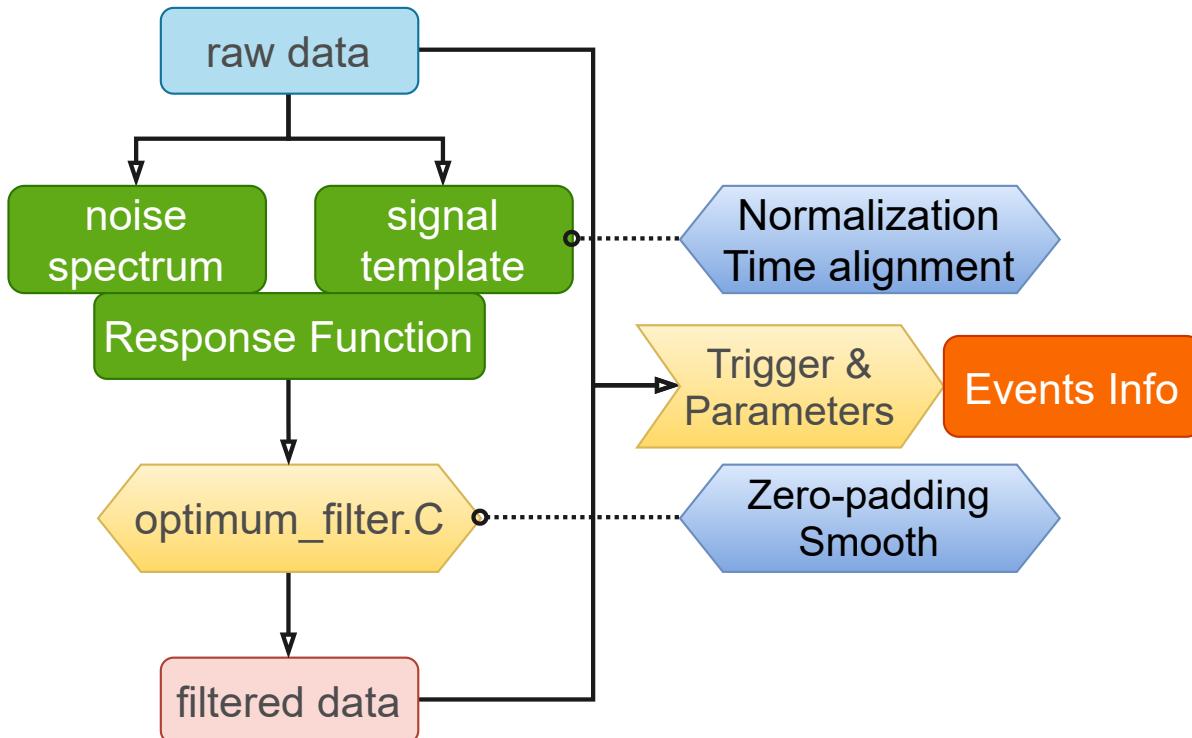


- 波形参数：利用滤波后的波形

$$\langle si \rangle = \frac{\sum_k v(t_k) \cdot [v(t_k) - A \cdot s(t_k)]^2}{\sum_k v(t_k)}$$

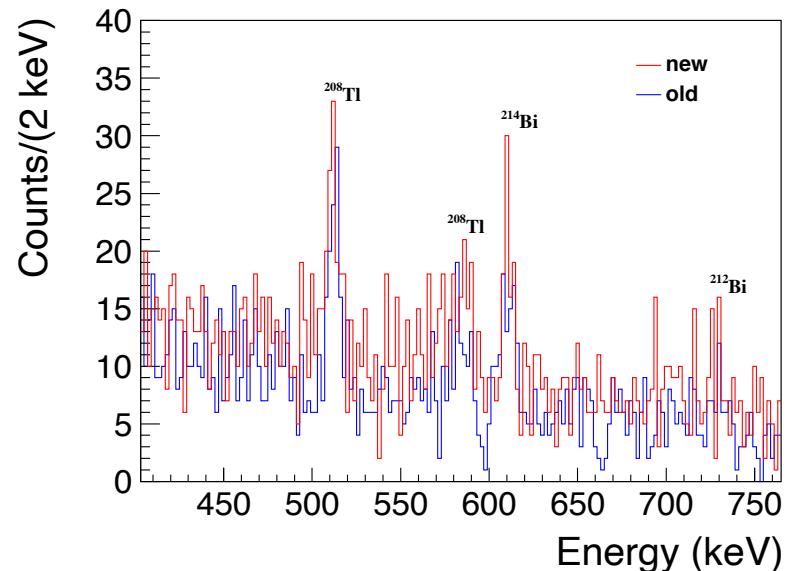
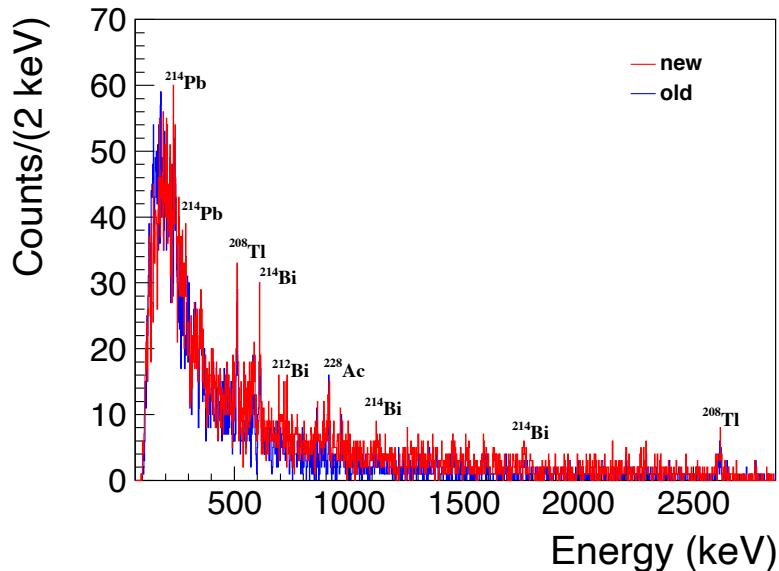


# 数据预处理软件框架



# 预处理能量分辨

- 预处理后数据分析：温度稳定性修正， $\gamma$  能量刻度
- 能谱：同一组原始数据，不同预处理程序
- 更好的能量分辨，更多的事例数@ 510 keV of  $\gamma$ - $^{208}\text{Tl}$ , 609 keV of  $\gamma$ - $^{214}\text{Bi}$  and 1764 keV, 2614 keV



# 模拟信号产生

- 声子模型：能量沉积温度响应

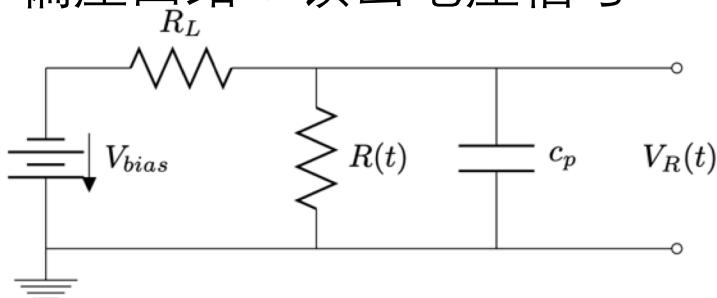
$$\Delta T(t) = A_T \left( -e^{-\frac{t}{\tau_r}} + \alpha e^{-\frac{t}{\tau_{d1}}} + (1 - \alpha) e^{-\frac{t}{\tau_{d2}}} \right)$$

- 热传感器：电阻温度响应

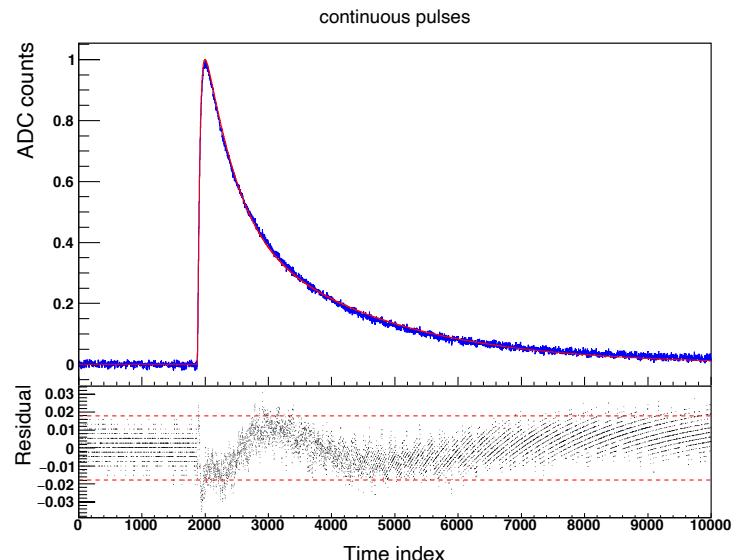
$$R(T) = R_0 \exp(T_0/T)^\gamma \quad \gamma = 0.5$$

$$\Delta R(\Delta T) \simeq R^B \left[ \exp(-\eta \Delta T / T^B) - 1 \right]$$

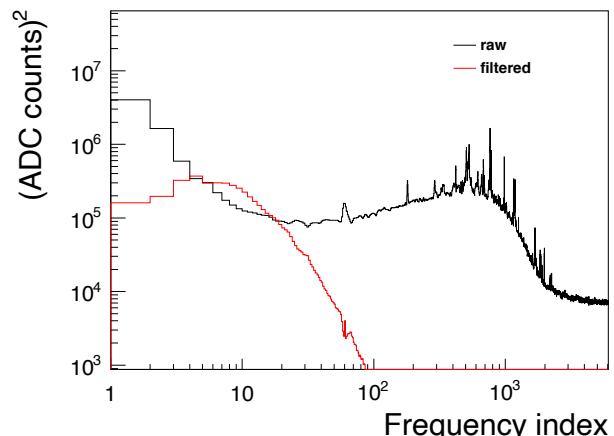
- 偏压回路：读出电压信号



$$\left[ \frac{R_L + R^B + \Delta R(t)}{R^B + \Delta R(t)} \right] \left[ V_{bias} \frac{R^B}{R^B + R_L} + \Delta V_R(t) \right] - V_{bias} + R_L C_p \frac{d \Delta V_R(t)}{dt} = 0$$



- 噪声：根据实际噪声功率谱产生



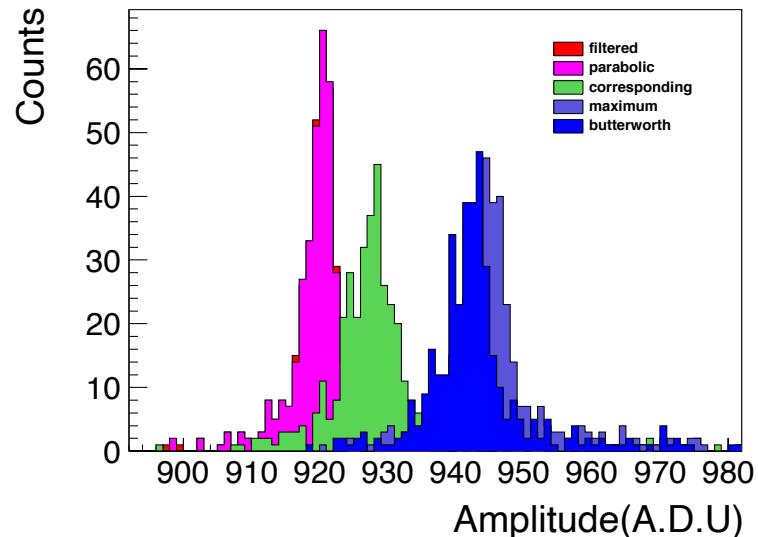
# 总结展望

- 基于数据预处理软件框架完成实验数据物理结果分析

- 应用滤波器后能量分辨
- 信号触发，事例参数提取
- 晶体量热器前期工作积累

- 展望：

- 根据信号、噪声模型模拟产生数据，应用机器学习优化波形参数的构造和筛选
- 基于数据预处理软件框架完成未来实验数据物理结果分析



# 结束页

---

谢谢！