



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

新型低温粒子探测器NTD-Ge 传感器的研发

薛明萱

核探测与核电子学国家重点实验室
中国科学技术大学

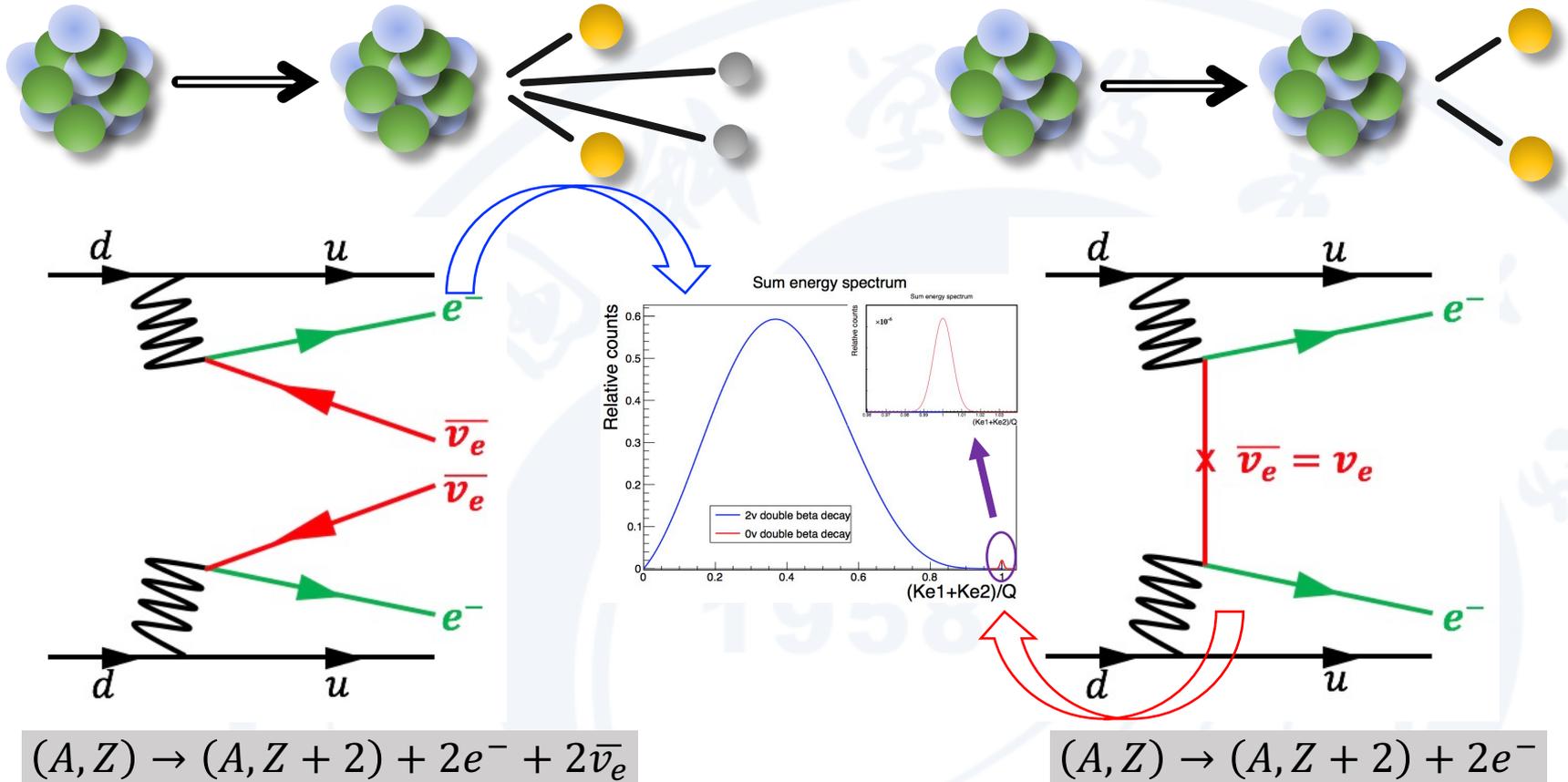
高能物理分会 2021. 08. 16-20 山东 青岛



内容概要

- 无中微子双贝塔衰变
- 低温粒子探测器
- NTD-Ge传感器研发
- 总结

无中微子双贝塔衰变



中微子的绝对质量大小、Majorana属性、轻子数破缺、物质-反物质不对称起源

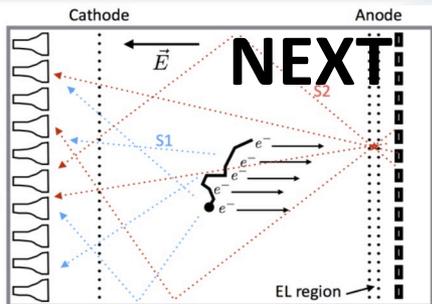
- 能谱法：末态两个电子的动能和在衰变Q值处；
- 径迹+能谱法：末态两个电子共顶点，且动能和位于Q值处。

0νDBD国际研究现状

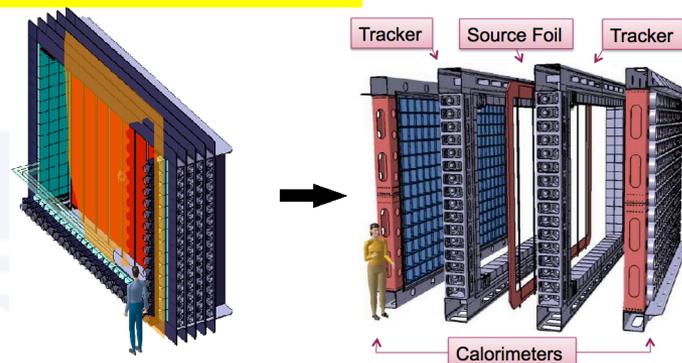
TPC EXO-200 → nEXO

^{136}Xe

TPC
Outer cryostat
Vacuum
Inner cryostat
150-400 meV
Refrigerant
 10^{25}y
Water shield



气体径迹室 ^{100}Mo , ^{82}Se , ^{116}Cd ...



SuperNEMO

半导体 MAJORANA

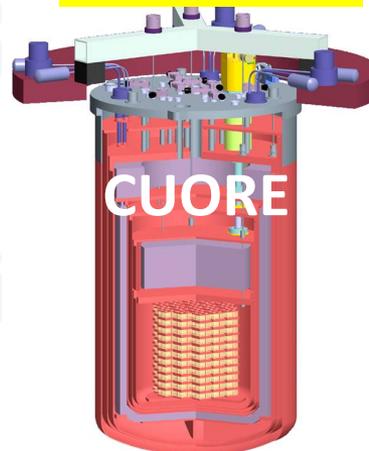
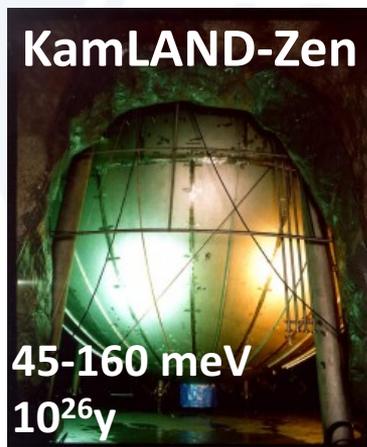
^{76}Ge



声子测量 ^{130}Te , ^{100}Mo

液闪 SNO+

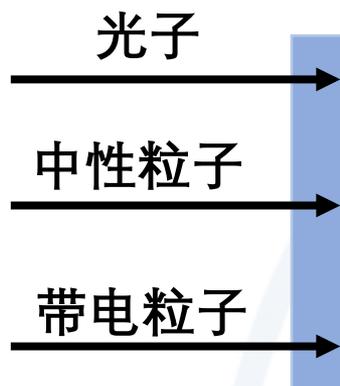
^{130}Te
 ^{136}Xe



低温粒子探测器——低温量热器

• 粒子与物质相互作用

- 信息载体：电子-离子，电子-空穴，闪烁荧光，声子

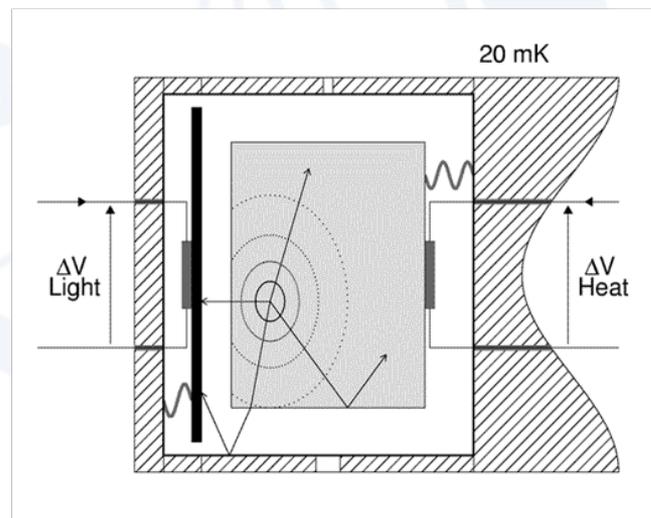


弹性碰撞：粒子沉积能量绝大部分($\sim 90\%$)最终转换为声子发射，产生“热”

非弹性碰撞：粒子沉积能量少部分($< 10\%$)转换为电子-离子（空穴）对，或者荧光

• 闪烁探测技术(NaI晶体)

- 光产额：40000荧光光子/MeV
- 波长： $\sim 400\text{ nm}$ ($\sim 3\text{ eV}$)
- 荧光光子总能量： 0.12 MeV ($\sim 12\%$)
- $\sim 88\%$ 的能量直接转化为热量(声子)，被自身吸收的荧光光子能量仍然会转化为热量(声子)



低温量热器

- 低温探测技术

- 基于声子(或以声子为媒介的)探测的粒子探测器，称为低温粒子探测器

LTD-Low Temp. Detector

CPD-Cryogenic Particle Detector

- “声子” (或次级的准粒子) 数正比于能量沉积
- 原则上，各种介质都可以用来做低温探测器(LTD)的探测元件

- 1949年物理学家使用毫米级氮化铌在15K温度下观测到单 α 事件，标志着低温量热器被首次应用到粒子物理学科

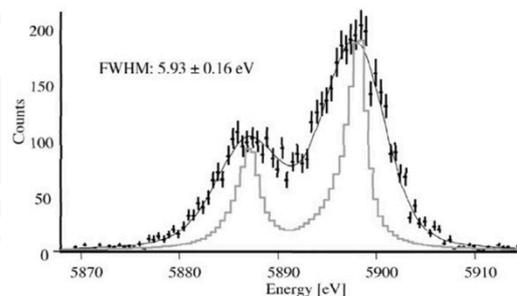
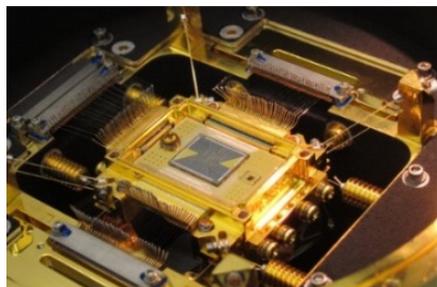
“The rapid technical developments of last years and their outstanding features make these detectors very attractive in a variety of field ranging from fundamental research to applied science.” (2015)

1987年以来，LTD的物理和相关技术成为物理界公认和关注的一个研究领域。

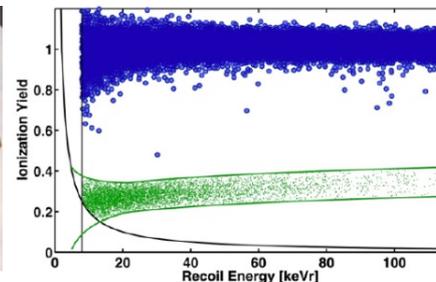
低温量热器——典型应用

- **应用** 天文学、粒子物理与原子核物理、原子物理学、量子技术新前沿等等

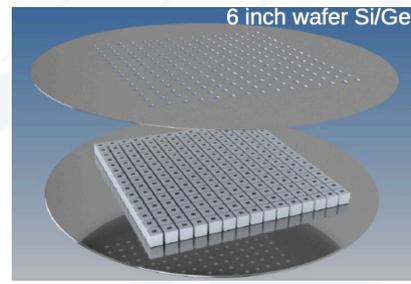
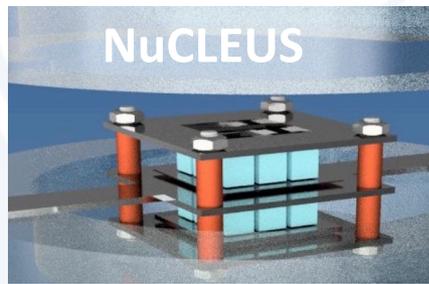
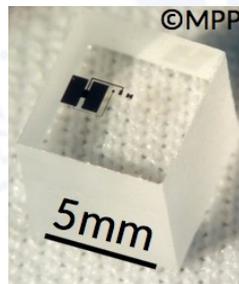
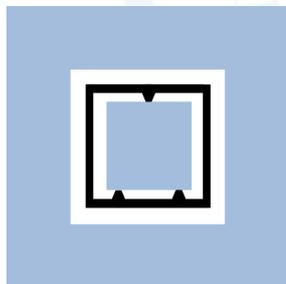
- ✓ X射线天文学



- ✓ 暗物质粒子寻找

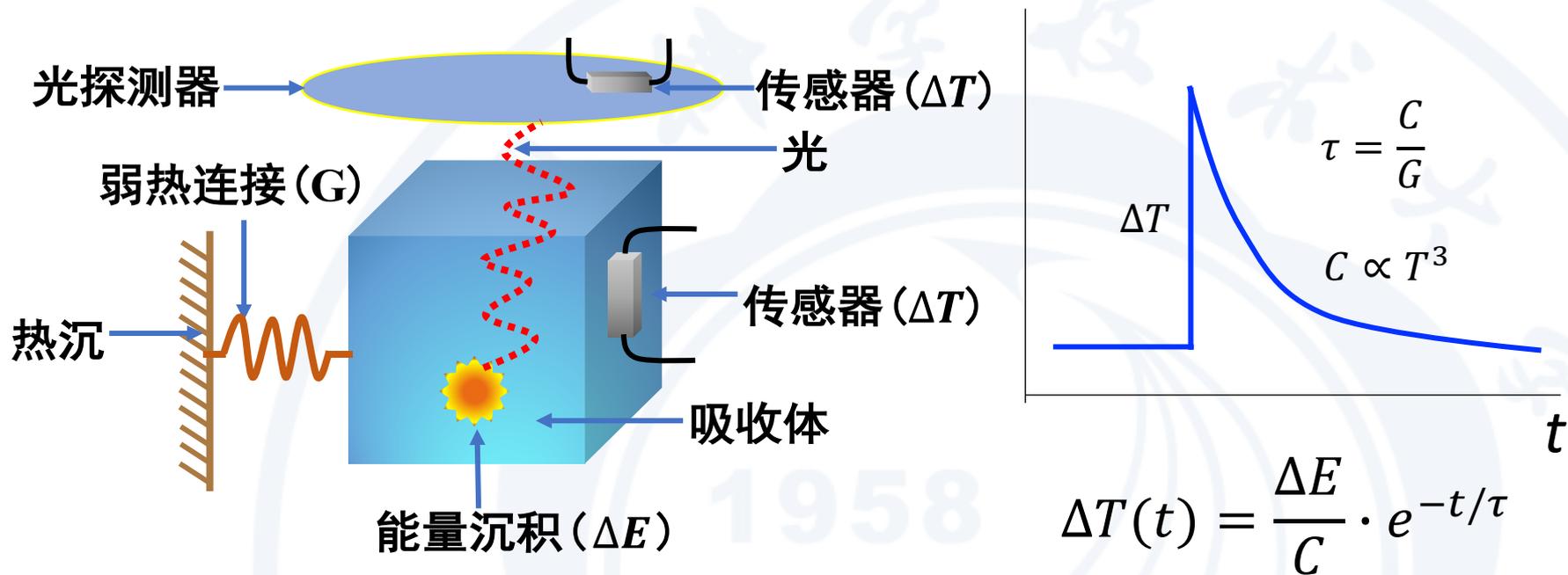


- ✓ 中微子弹性相干散射



低温晶体量热器—— $0\nu\beta\beta$ 探测

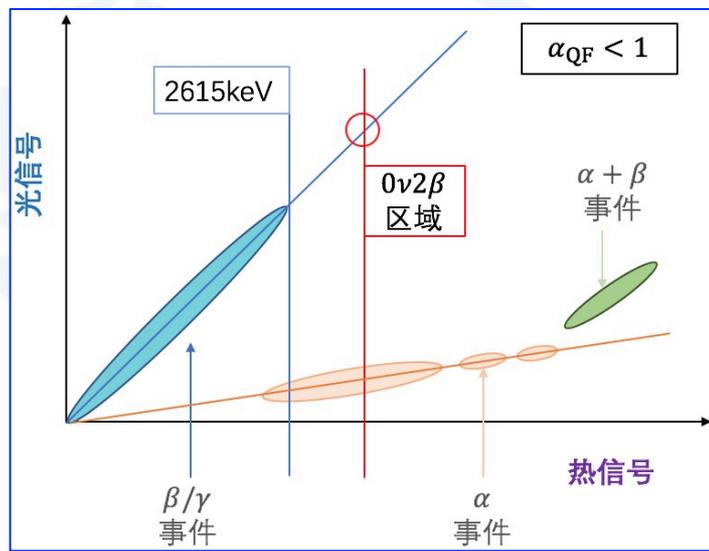
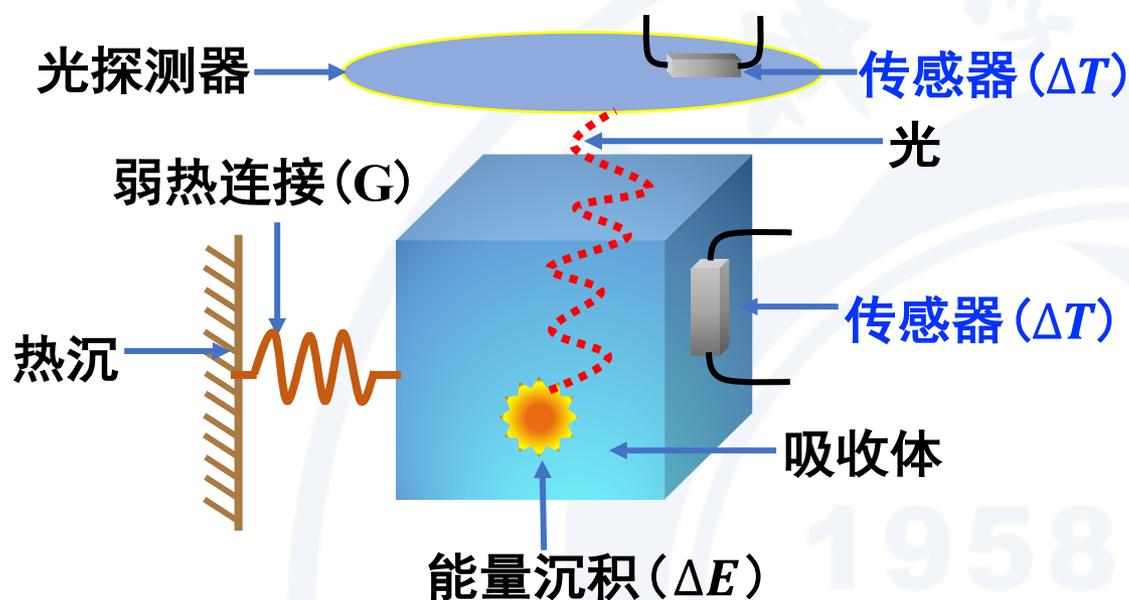
• 低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 探测原理——能谱法



- ✓ 吸收体材料选择广泛，验证更多理论预测具有 $0\nu\beta\beta$ 的核素
- ✓ “源=探测器”，无能量损失，极高探测效率，
- ✓ 极好的能量分辨率，探测媒介子——声子，**5.3keV@2615keV** (CUPID-Mo)
- ✓ 极好的粒子鉴别能力，抑制本底，“光-热”两相读出

低温晶体量热器—— $0\nu\beta\beta$ 探测

• 低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 探测原理——能谱法



• 低温晶体量热器核心组成

- 吸收体，粒子通过与吸收体原子碰撞，把能量沉积在吸收体内
- **温度传感器**，测量吸收体的温度变化信号，两者之间有极好的热连接
- 低温恒温器（热沉），用来偏置、稳定传感器的工作温度区间

NTD-Ge低温传感器

✓ 中子核嬗变掺杂锗传感器 (Neutron Transmutation Doped Ge thermistors)

Five stable isotopes	Doped process	Type
${}^{70}_{32}\text{Ge}$ (3.052b)	${}^{70}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{71}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{EC} {}^{71}_{31}\text{Ga} + \nu_e$ ($T_{1/2} = 11.43d$)	Ga acceptors form p-type
${}^{72}_{32}\text{Ge}$	${}^{72}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{73}_{32}\text{Ge}(\text{stable})$	-
${}^{73}_{32}\text{Ge}$	${}^{73}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{74}_{32}\text{Ge}(\text{stable})$	-
${}^{74}_{32}\text{Ge}$ (0.519b)	${}^{74}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{75}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{\beta^-} {}^{75}_{33}\text{As} + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 82.8min$)	Donors n-type
${}^{76}_{32}\text{Ge}$ (0.154b)	${}^{76}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{77}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{\beta^-} {}^{77}_{33}\text{As} + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 11.3hrs$) $\xrightarrow{\beta^-} {}^{77}_{34}\text{Se} + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 38.8hrs$)	Donors n-type

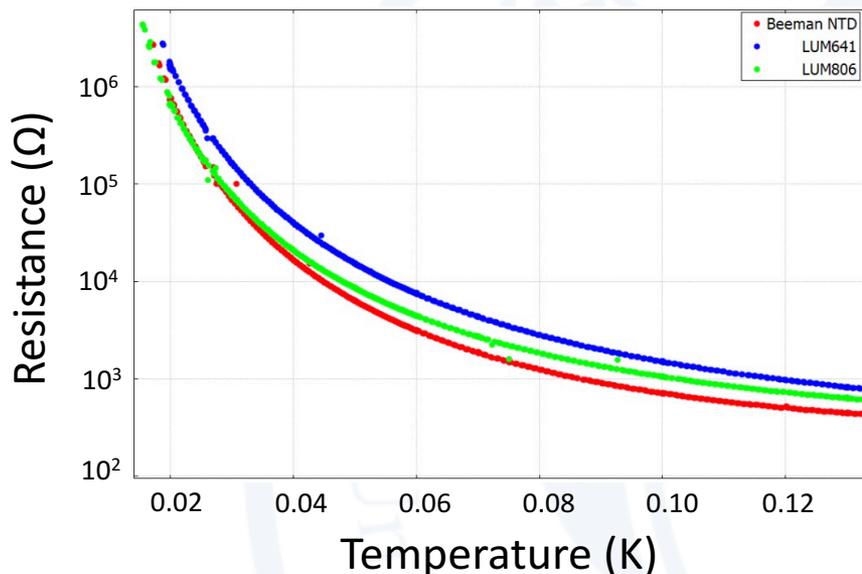
- 净载流子浓度: $N_A - N_D = N_{{}^{71}_{31}\text{Ga}} - (N_{{}^{75}_{33}\text{As}} + 2 \times N_{{}^{77}_{34}\text{Se}})$
- 蛙跳传导机制(Hopping Conduction) 在足够低温温度下(<1 K), 电子作为载流子将从一个能级跃迁到另一个能级, 实现半导体热敏电阻属性

NTD-Ge低温传感器

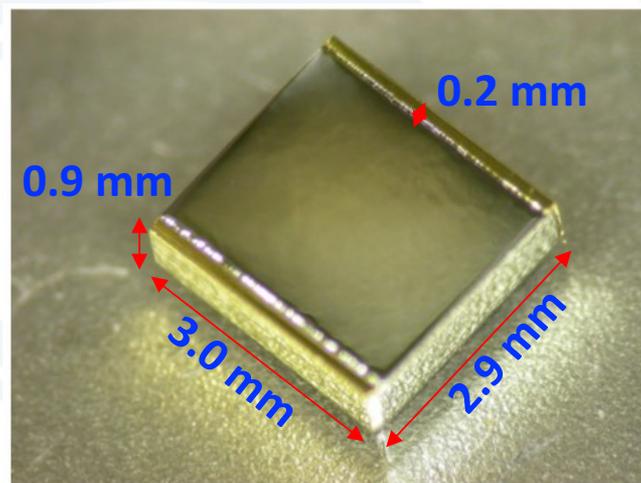
- 传感器热敏电阻描述公式

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

Ge本征属性 $\rightarrow R_0$ 掺杂浓度 $\rightarrow T_0$ 其中, $\alpha = 0.5$



NTD-Ge传感器温度-电阻变化关系

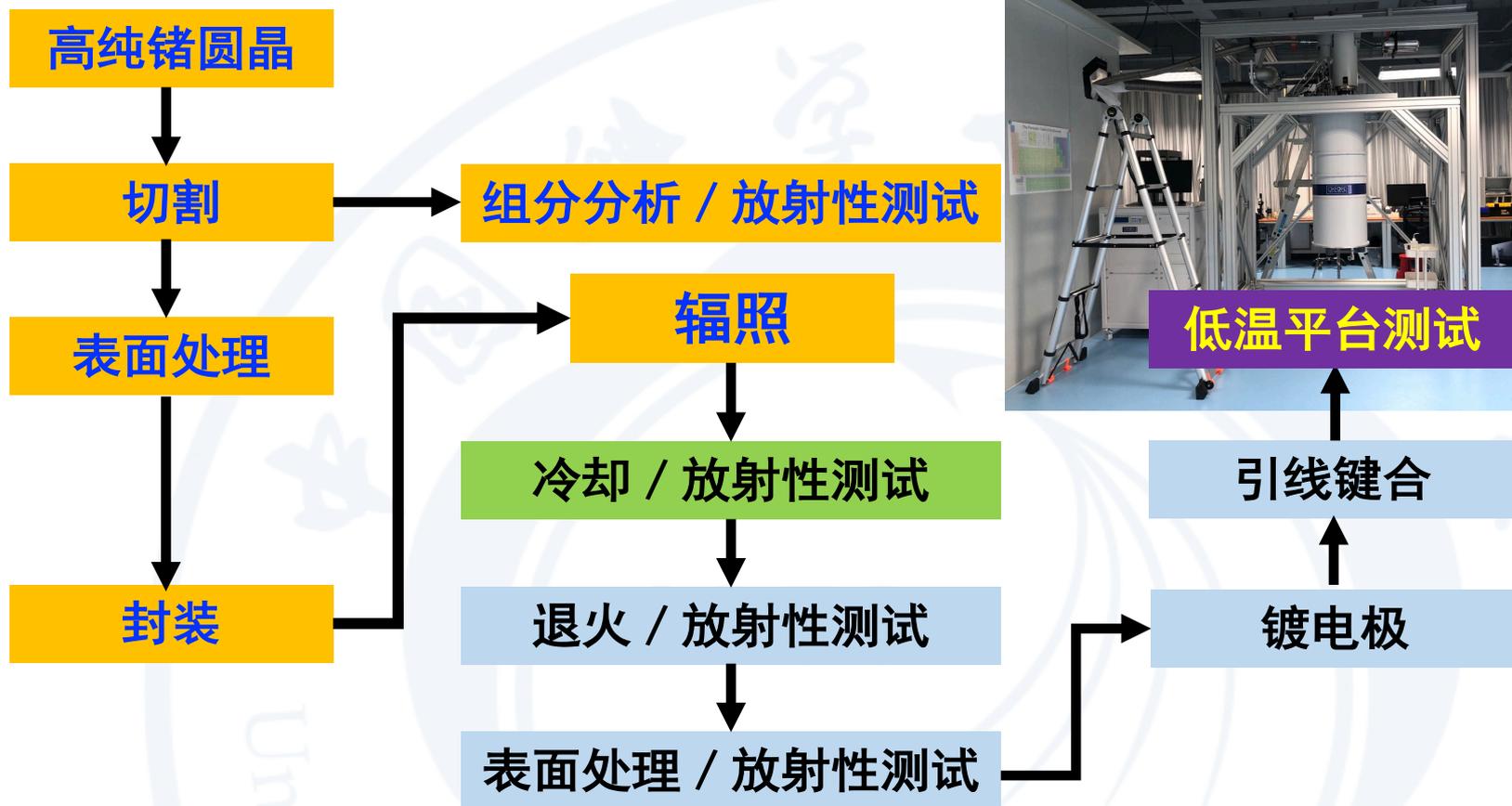


尺寸 3×2.9×0.2 mm³

典型NTD-Ge传感器

- NTD-Ge由伯克利国家实验室Beeman研制, 典型取值 $R_0 \sim 1 \Omega$, $T_0 \sim 4 K$

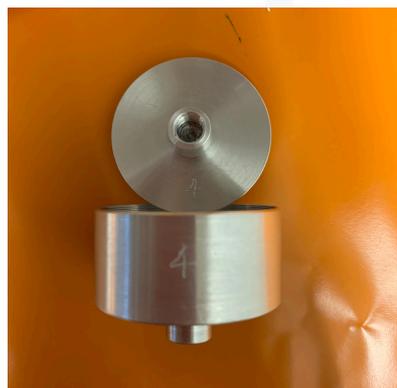
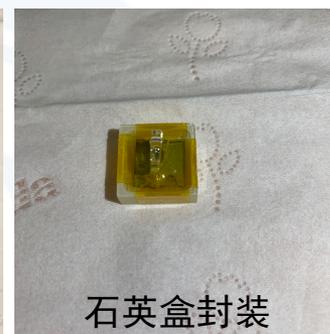
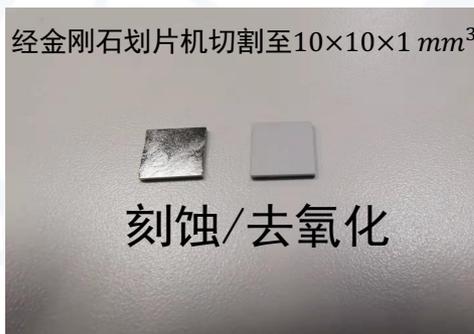
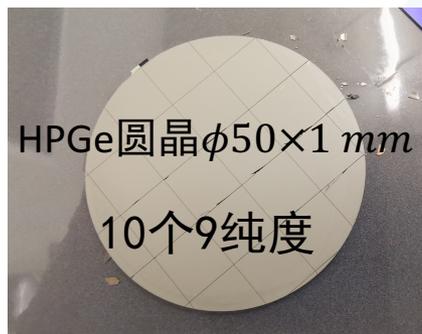
NTD-Ge低温传感器技术研发路线



- 已进行高纯锗圆晶切割、表面处理、封装、辐照等操作
- 目前正在冷却/放射性检测阶段

401所CARR堆辐照

- 中国先进研究堆（China Advanced Research Reactor, CARR）
- 本次实验辐照功率**10.327MW**（ $2.5E18/cm^2$ ）
- 辐照时间2020年12月22日14:14至2020年12月25日06.43
- 实际辐照时长**64小时29分钟**
- 中子辐照积分通量

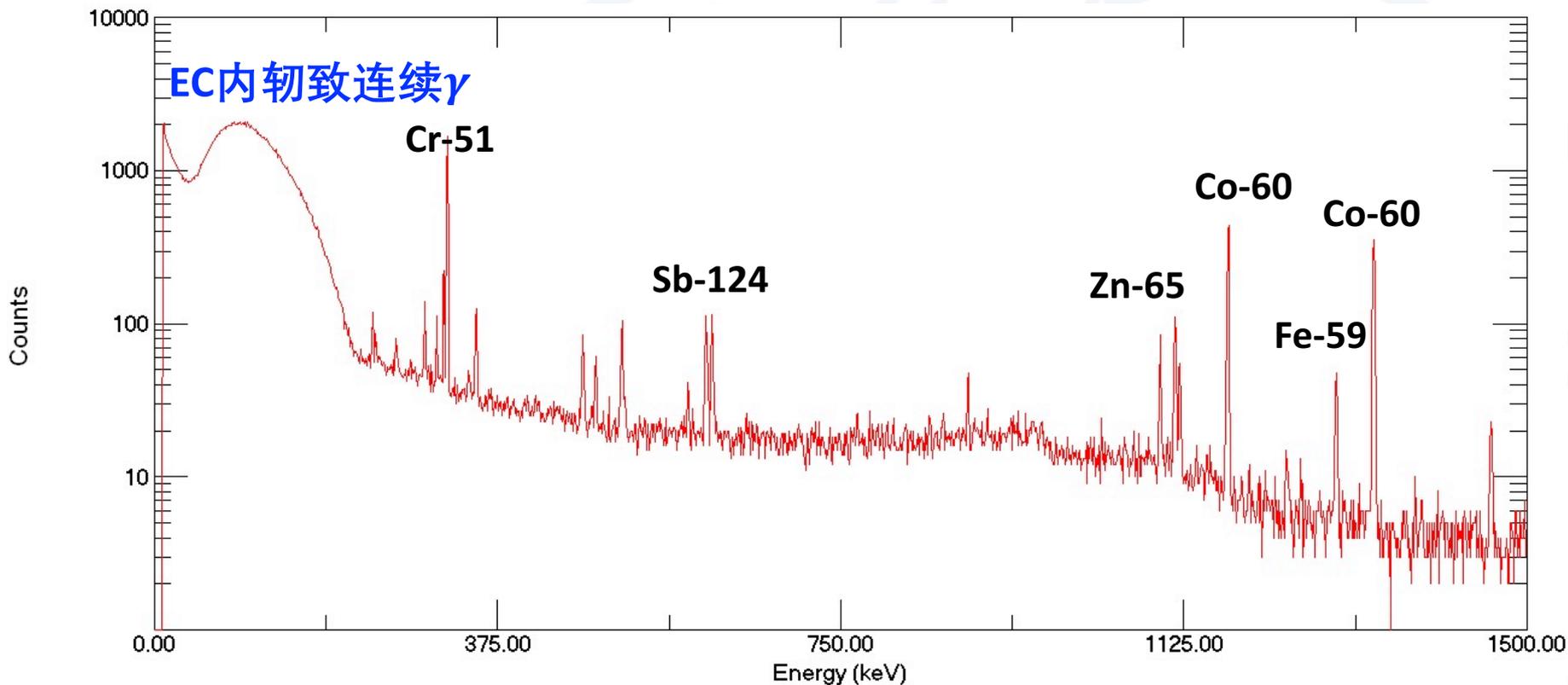


密封装进铝盒



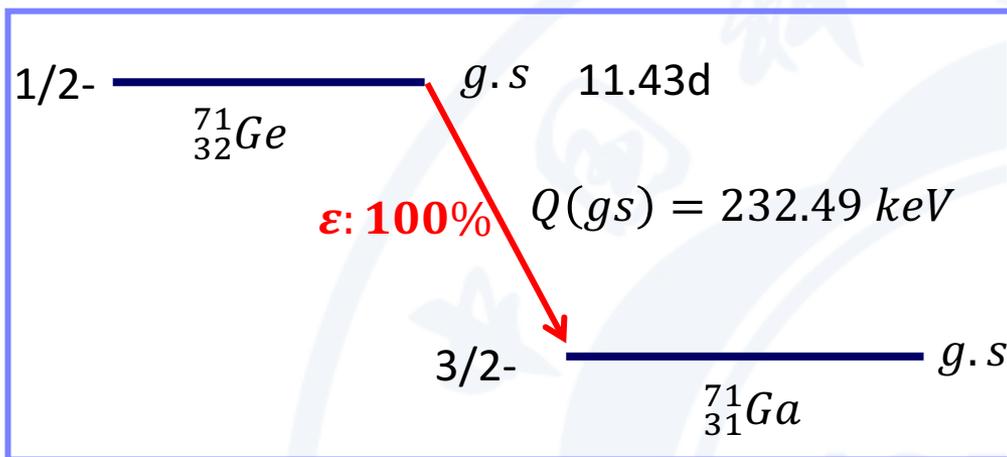
NTD-Ge放射性活度测试

- 低本底HPGe谱仪测试辐照后HPGe片能谱图



NTD-Ge辐照通量检测

- 辐照过程无剂量监测片
- 采用Ge自身放射性标定——半衰期相对较长&信号相对干净



Gamma and X-ray radiation:

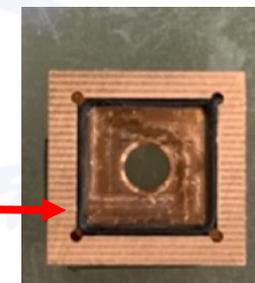
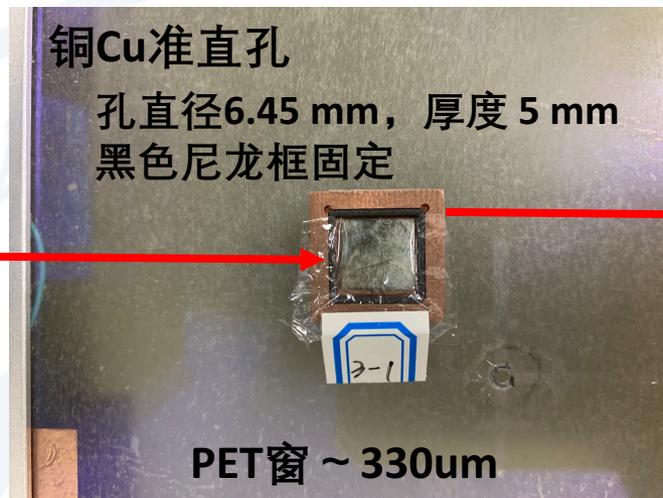
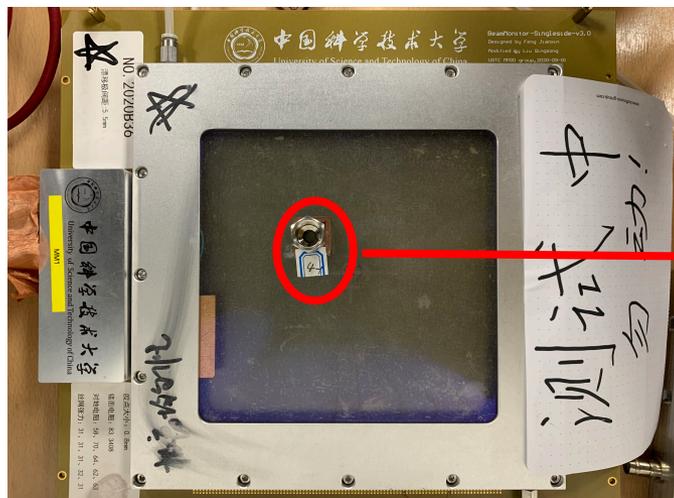
	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR 1	1.1	1.52 % 5	1.68E-5 5
XR k α 2	9.225	13.3 % 5	0.00123 5
XR k α 1	9.252	26.1 % 10	0.00242 9
XR k β 3	10.26	1.66 % 6	1.71E-4 6
XR k β 1	10.264	3.24 % 11	3.33E-4 12
XR k β 2	10.366	0.0275 % 10	2.85E-6 10

- 模拟与实验相结合
- 根据探测器测得的kX-ray反推中子辐照积分通量
- 选用三种探测器：

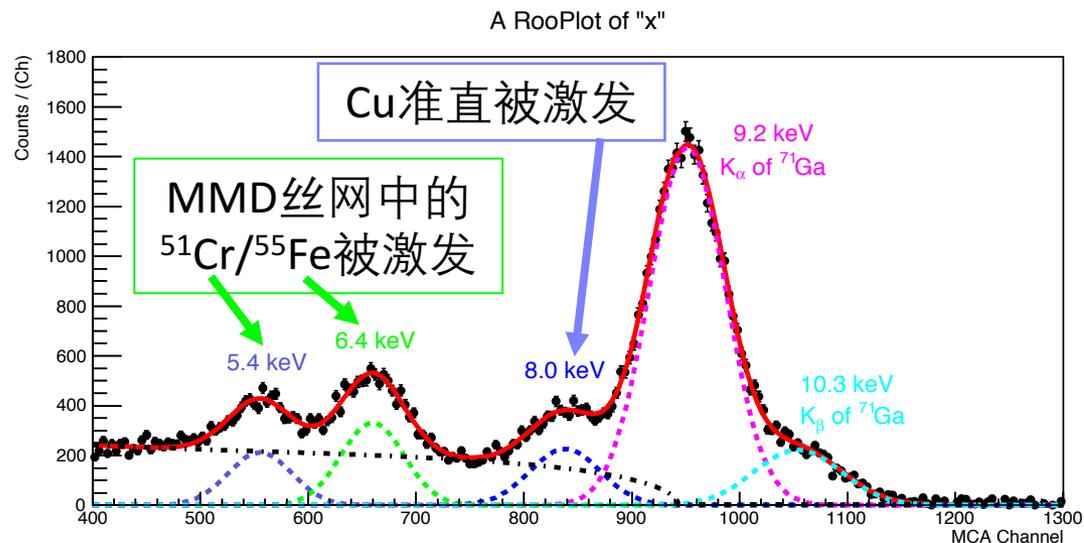
微结构气体探测器MMD
硅漂移探测器SDD
溴化镧闪烁体探测器LBC

微结构气体探测器MMD测试

- MMD探测器灵敏面积 $15 \times 15 \text{ cm}^2$, 1.1cm气隙, 气体: 95%Ne+5%iC4H10

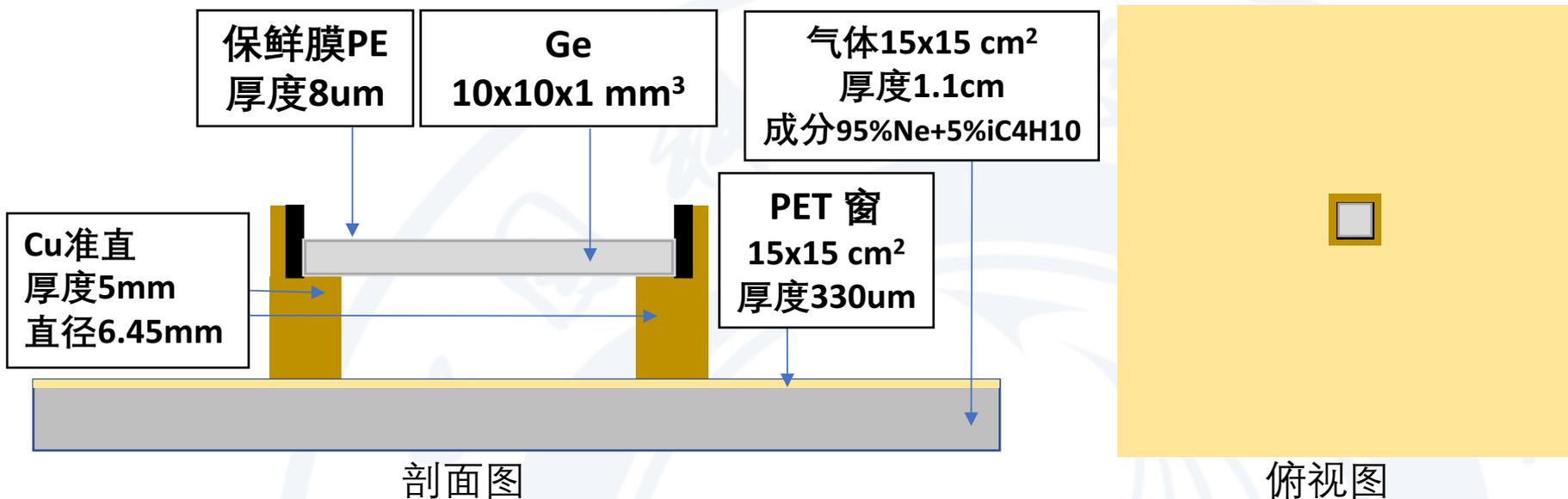


测试结果

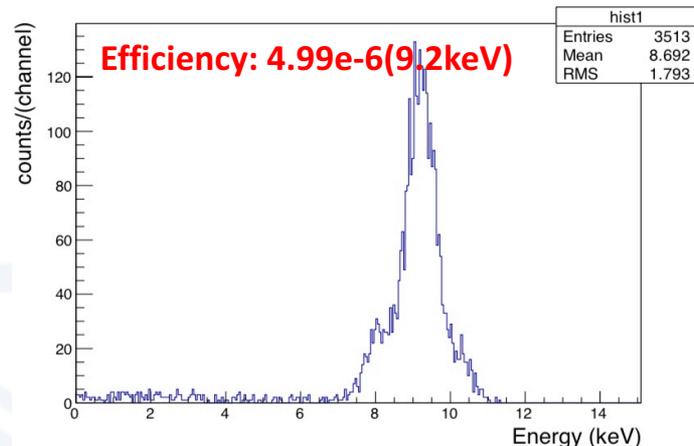
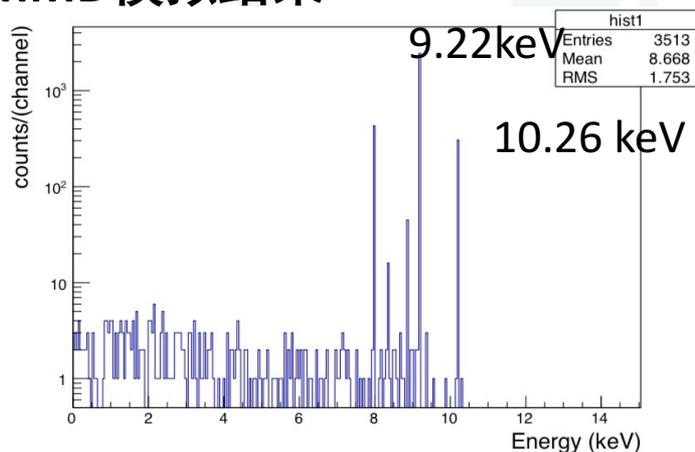


微结构气体探测器MMD测试Geant4模拟

• MMD探测器建模

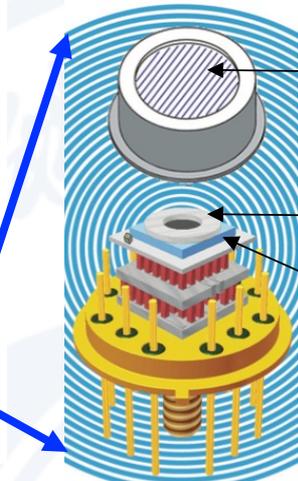


• MMD模拟结果



硅漂移探测器SDD测试

• SDD探测器



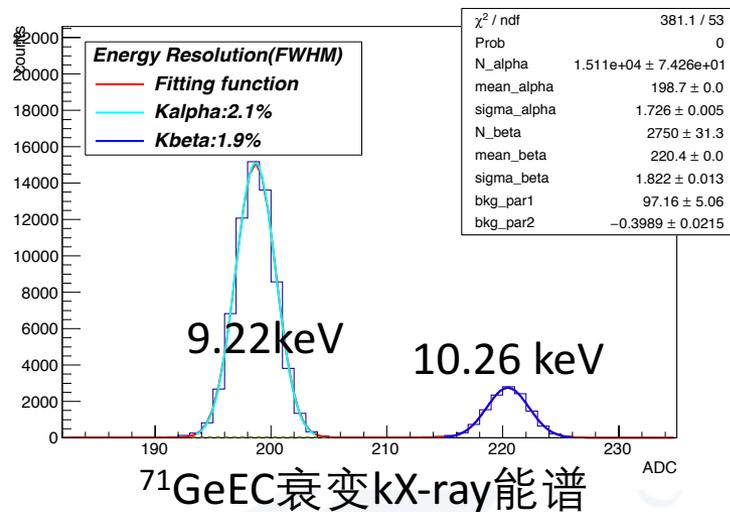
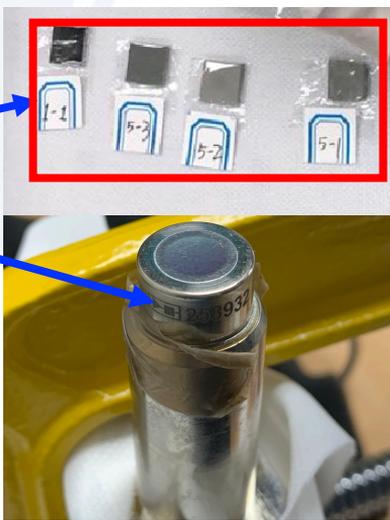
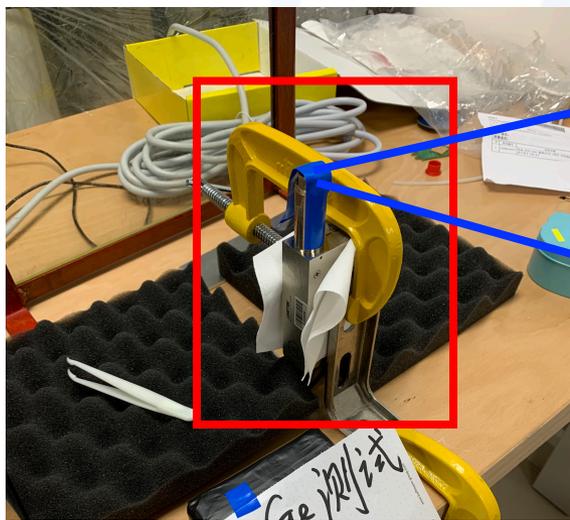
Be窗 $\phi 7\text{mm} \times 12.5\mu\text{m}$

多层准直 $\phi 4.66\text{mm}$
厚度 $100\mu\text{m}$ 钨W + $35\mu\text{m}$ 铬Cr + $15\mu\text{m}$ 钛Ti + $75\mu\text{m}$ 铝Al

硅晶体 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 500\mu\text{m}$

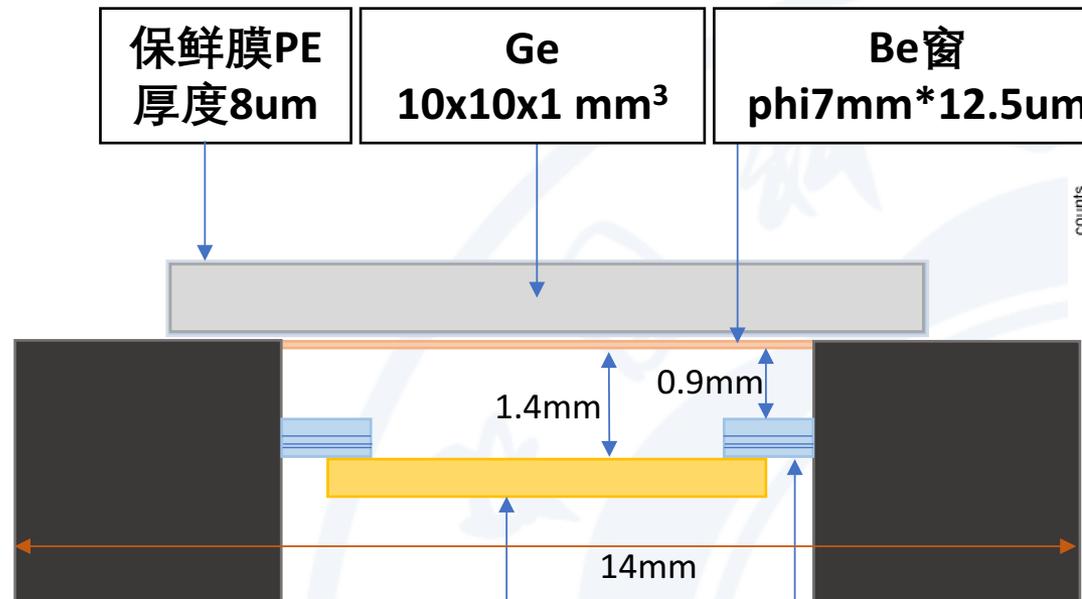
测试能区 2-30 keV
能量分辨率 $120\text{ eV} @ 5.9\text{keV}$ (Fe55)

• 实验室测试实物图



硅漂移探测器SDDGeant4模拟

• SDD探测器建模



保鲜膜PE
厚度8um

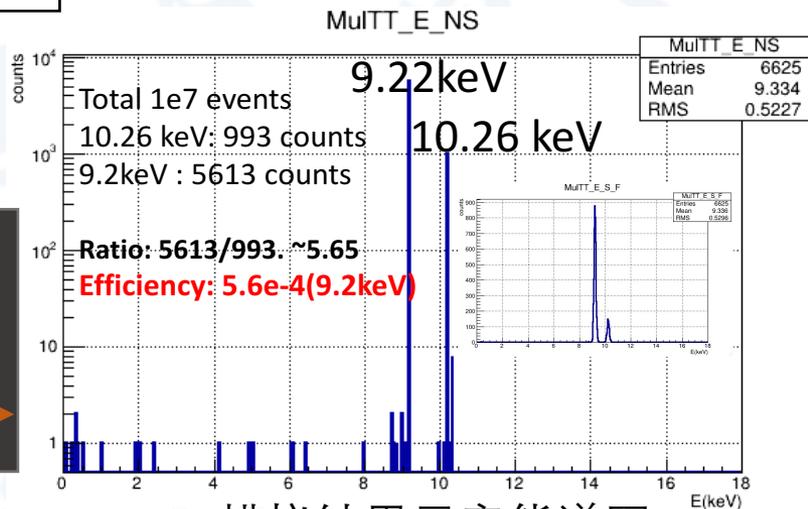
Ge
10x10x1 mm³

Be窗
phi7mm*12.5um

Si晶体
5mmx5mmx500um

Ni套筒
内径3.5mm
外径7mm

多层准直
W100um
Cr35um
Ti15um
Al75um
准直phi4.66mm

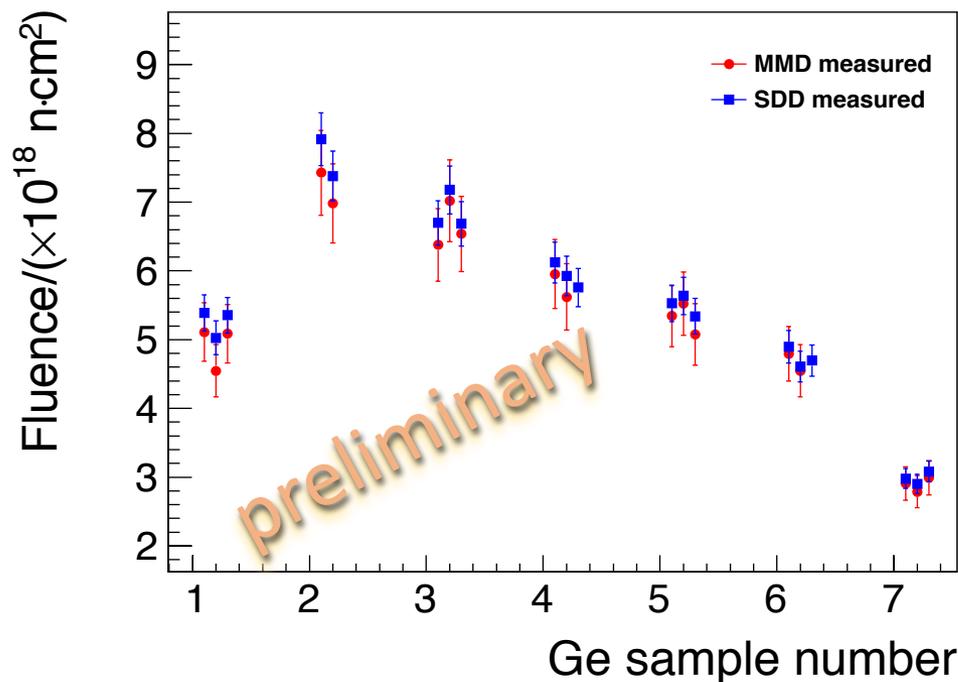


G4模拟结果示意能谱图

W: LX-ray 8.3~8.4 keV
Cr: KX-ray 5.4 keV
Ti: KX-ray 4.5 keV
Al: KX-ray ~1.5 keV

中子辐照积分通量结果

- 初步测试结果



误差来源	相对误差 (%)	
	MMD	SDD
截面	1.5385	1.5385
探测器效率	7.0335	2.1203
输入参数	2.9267	2.9268
半衰期	2.9847	2.8612
合计	8.3253	4.8683

- 硅漂移探测器SDD与微结构气体探测器MMD测试检测通量结果一致

总结

- **基于声子探测的低温粒子探测器对稀有衰变物理有其独特优势**
 - 极好的能量分辨率 (5.3keV@2615keV)
 - 极低的探测器能量阈值
 - 独特的粒子鉴别能力
- **中子辐照核嬗变掺杂高纯锗 (NTD-Ge) 半导体低温传感器研发**
 - 工作温度mK深冷低温，动态范围大，在粒子物理/核物理领域应用前景广泛
 - 已完成反应堆中子辐照，并实验获得实际辐照通量
 - 预期进行后续技术工艺，并在mK稀释制冷机平台内测试
- **HPGe片可以作为一种新的反应堆中子通量监测片**
 - ^{70}Ge 具有相对适中的热中子俘获截面， ^{71}Ge 具有相对适中的放射性半衰期
 - 特征X-ray为10 keV量级，匹配探测器性价比高
 - 冷却1-2年后，可以作为半导体电子学器件回收使用，环境友好型

谢谢