

大湾区国创中心粒子应用技术创新中心

低本底高纯锗探测器研制进展

付逸冬

2024年5月10日

COUSP2024, 西昌



清华大学 工程物理系
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

➤ **背景介绍**

➤ **设计与工艺**

➤ **测试结果及讨论**

科学技术部
财政部 文件

国科发区〔2020〕93号

科技部 财政部印发《关于推进国家
技术创新中心建设的总体
方案（暂行）》的通知

各省、自治区、直辖市及计划单列市科技厅（委、局）、财政厅（局），
新疆生产建设兵团科技局、财政局：

为深入贯彻落实习近平总书记关于推动国家技术创新中心
建设的重要讲话精神，加强国家技术创新中心建设布局的顶层设

科技部统筹谋划，在全国布局3家综合类国家技术创新中心，若干家领域类国家技术创新中心，形成整体性的战略科技力量布局。

领域类（16家）

- 国家高速列车技术创新中心
- 国家新能源汽车技术创新中心
- 国家合成生物技术创新中心
- 国家新型显示技术创新中心**
- 国家生物药技术创新中心
- 国家生猪技术创新中心
- 国家耐盐碱水稻技术创新中心
- 国家玉米种业技术创新中心
- 国家燃料电池技术创新中心
- 国家第三代半导体技术创新中心**
-



综合类

京津冀国家技术创新中心

长三角国家技术创新中心

粤港澳大湾区国家技术创新中心



广东省科学技术厅

广州市人民政府

广州高新技术产业
开发区管理委员会

清华大学

粤港澳大湾区国家技术创新中心

总部
直属
创新
平台

工业软件产业发展中心

智能系统创新基地

粒子应用技术创新中心

...

集成电路领域

生物医药领域

数字电网领域

...

清华珠三角研究院



粒子应用技术创新中心（以下简称“粒子创新中心”）作为大湾区国创中心直属创新平台之一，源于清华大学工程物理系的优势学科基础与创新技术积累，坚持“四个面向”，以**发展高端粒子应用医疗装备、科学仪器、安全与工业装备**作为主要方向。

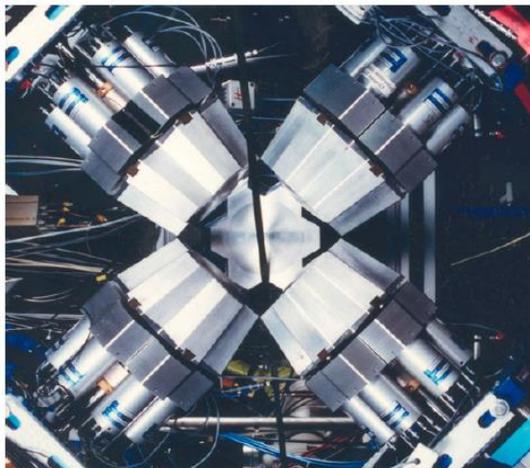
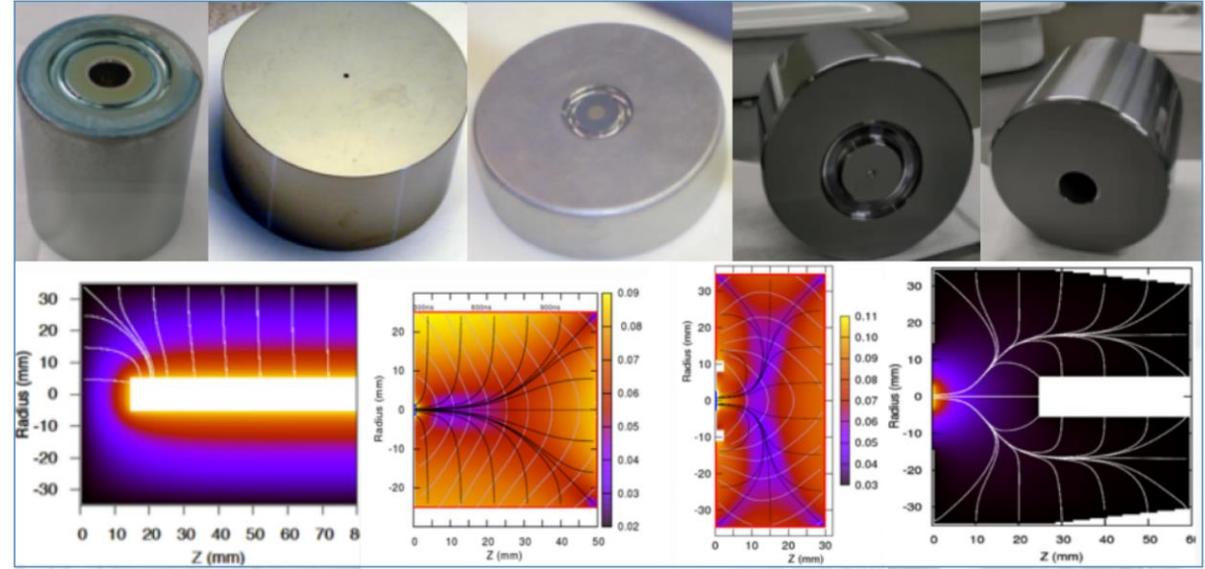
主要研究方向包括：先进SPECT技术与系统，高纯锗探测器系列，超高分辨电镜，准单能X光源等。

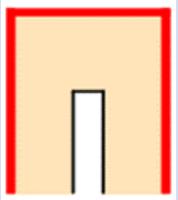
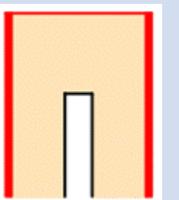
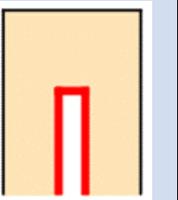
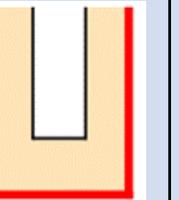
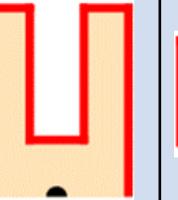
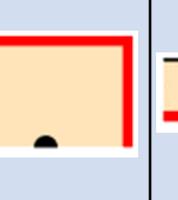
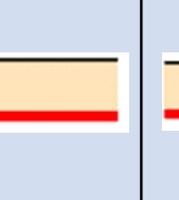
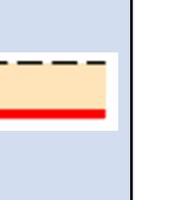


高纯锗技术介绍

专业发展现状:

- 国创中心高纯锗项目团队由清华工物系李玉兰教授领衔
- 在应用的推动下, 随着晶体生长技术、电极制备技术、低噪声前端读出电子技术的发展, 先后推出P型同轴、N型同轴、阱型、宽能、低阈值、小平面等多种类型的探测器。
- 近十年来, 随着暗物质探测、无中微子双贝塔衰变等特殊需求, 进一步陆续发展出点电极、方向同轴等探测器。(清华主导, 掌握核心)
- 伽马谱学, 紧凑型
- 工作环境: 真空、液氮、液氩



类型	P型同轴	P型宽能	N型同轴	阱型	ICPC阱型	点电极	平面型	多电极
电极结构示意图								
主要应用	谱仪, 传统	谱仪, 更低能量	能谱, 耐中子照射	4 π , 小样品	小样品, 暗物质, 2 β 衰变	暗物质	X射线谱仪	位置灵敏, Compton 成像

➤ 高纯锗探测器

- 技术成熟，已成功制造100余台套探测器
- 技术指标达到或优于国际水平
 - 40%效率同轴探测器：0.90keV@122keV, 1.88keV@1332keV
- **NEW!** 新推出宽能型探测器
 - 采用自主知识产权薄窗电极，能量范围覆盖3keV~10MeV
 - 性能指标优异，达到或优于国际水平
- 探测器稳定性、一致性好

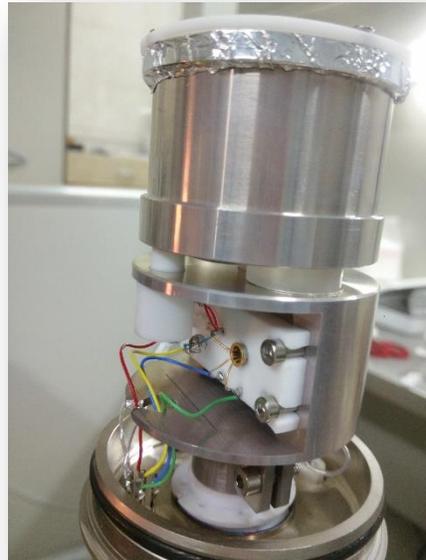




图 1 宽能高纯锗探测器



图 2 带铍窗的真空装置



图 3 前端低噪声电子学

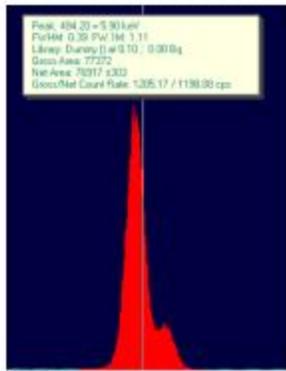


图 4 Fe-55 测试能谱

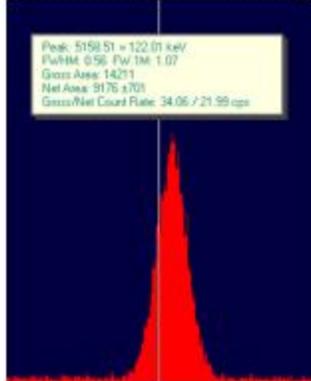


图 5 Co-57 测试能谱

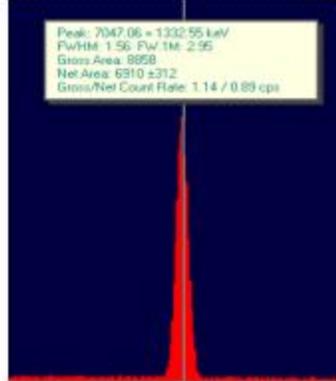


图 6 Co-60 测试能谱



➤ 宽能型探测器

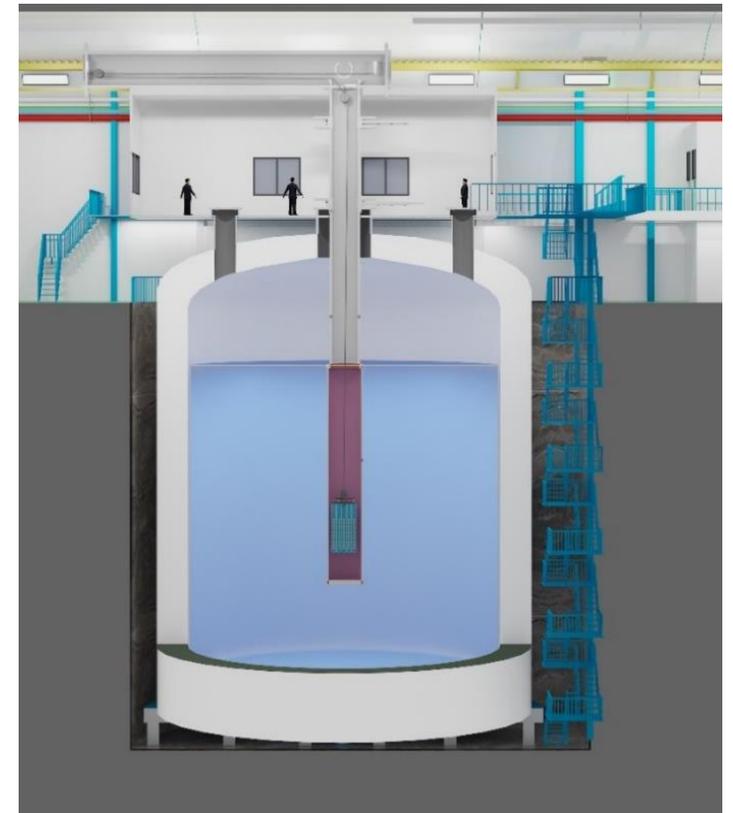
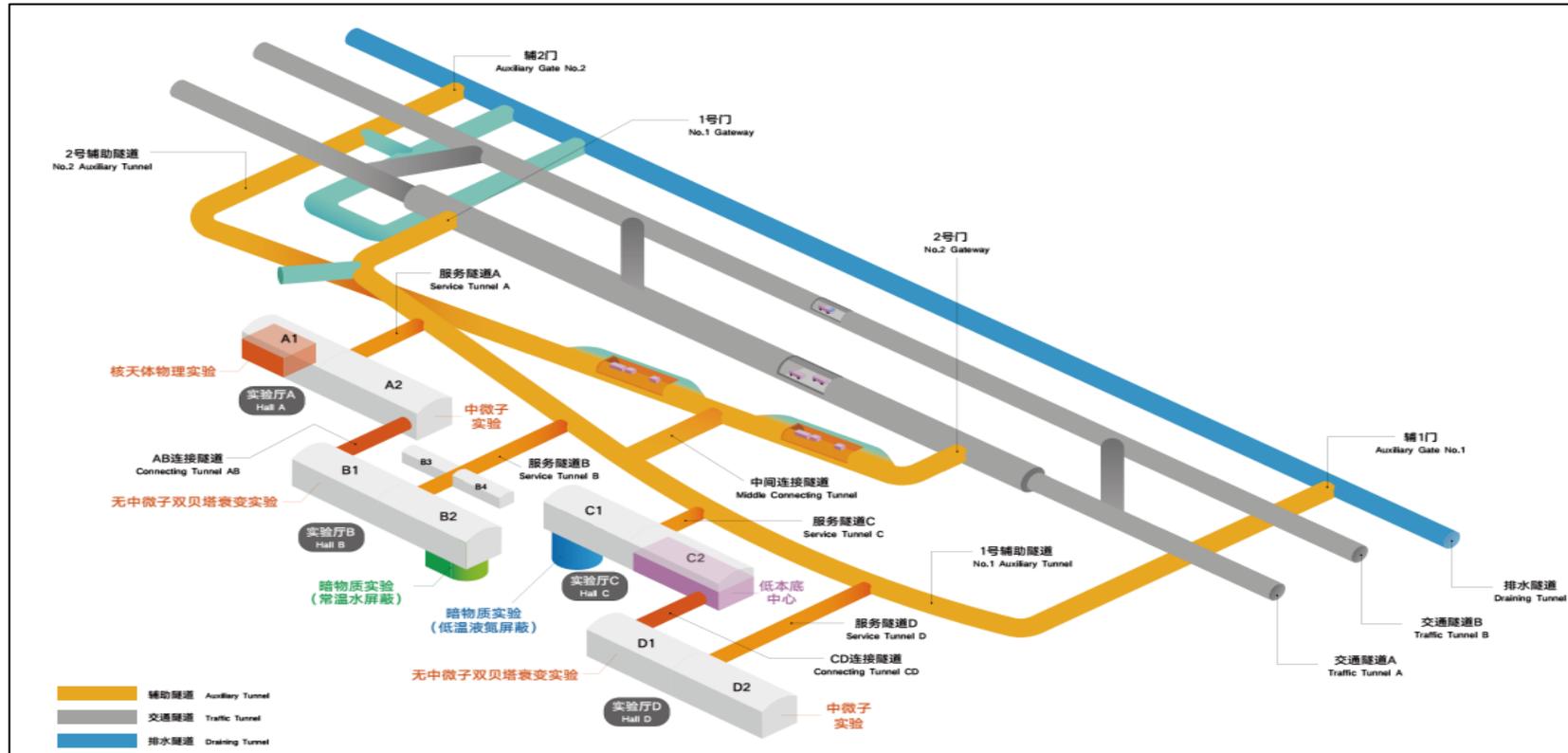
- 0.39 keV (对 5.9 keV 能峰);
- 0.56 keV (对 121.8 keV 能峰);
- 1.6 keV (对 1332.5 keV 能峰)。

➤ 制冷方式

- 液氮回凝制冷 (直插式/一体式)
- 纯电制冷

应用目标

- 作为源自清华工物系的技术，高纯锗团队与CJPL、CDEX组保持良好合作
- 承担CJPL-II 5台低本底高纯锗探测器的研制，拟用于地下放射性测量分析系统



应用目标



➤ **应用目标:**

- CJPL-II 锦屏大设施
mBq/kg级放射性测量与分析系统

μBq/kg 级

- 5台P型同轴HPGe (进口)

mBq/kg级

- **5台P型同轴HPGe (国产)**
- 5台P型同轴HPGe (进口)
- 2台N型同轴HPGe (进口)
- 2台井型HPGe (进口)
- 1台低能平面HPGe (进口)

完全对标进口探测器:

- 60cm长U型冷指;
- 相对探测效率 $\geq 100\%$;
- 能量分辨率 $\leq 2.2\text{keV}@1332\text{keV}$,
 $\leq 1.4\text{keV}@122\text{keV}$;
- 低温保持器材料U/Th含量 $< 0.1\text{ppb}$;
- MDA达到mBq/kg量级

➤ 背景介绍

➤ 设计与工艺

➤ 测试结果及讨论

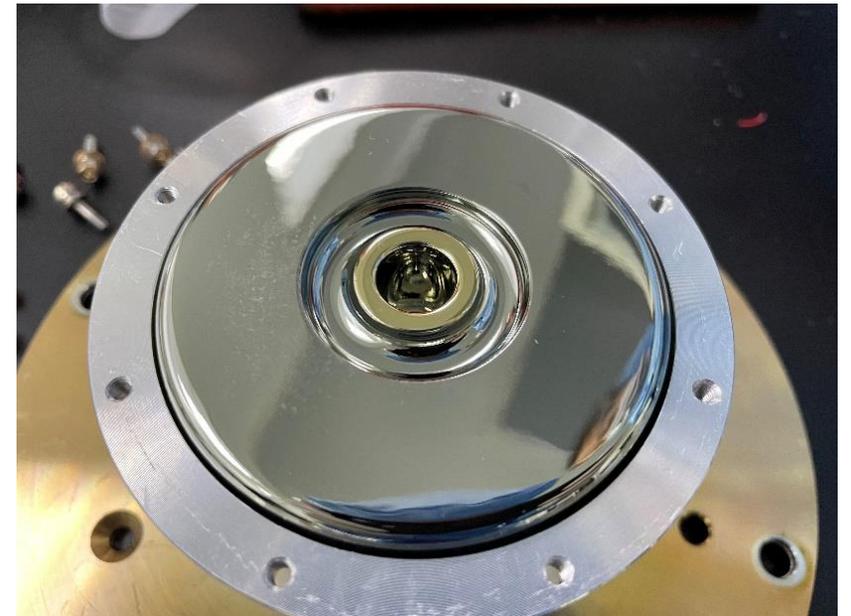
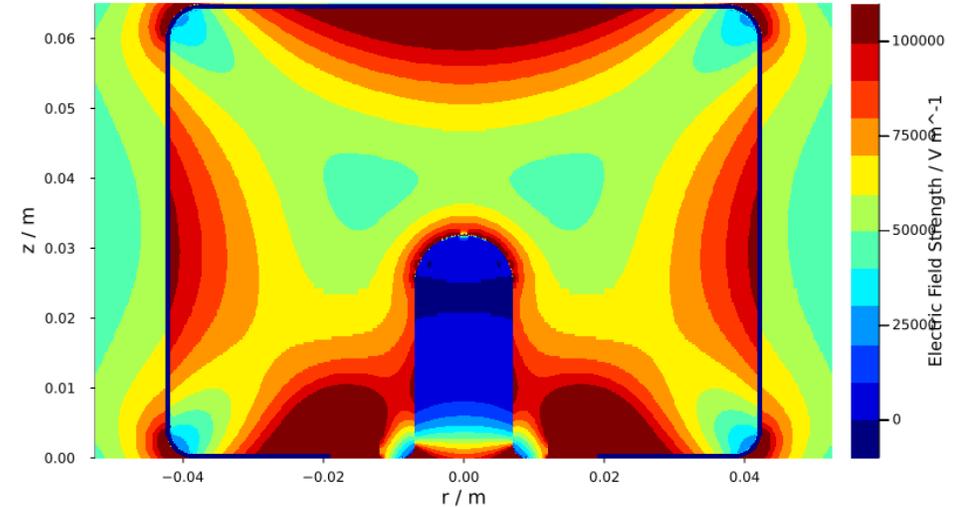
➤ 对探测器的指标要求:

- 60cm长U型冷指;
- 相对探测效率 $\geq 100\%$;
- 能量分辨率 $\leq 2.2\text{keV}@1332\text{keV}$, $\leq 1.4\text{keV}@122\text{keV}$;

➤ 设计情况:

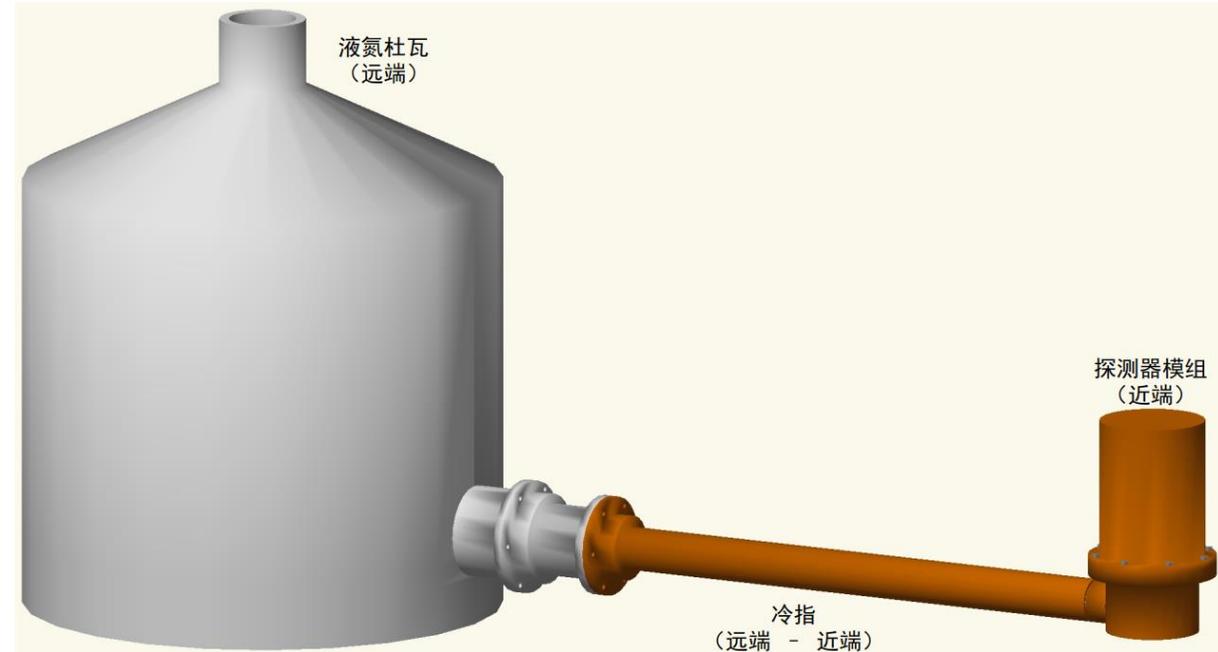
- P型同轴探测器
- 采用 $\Phi 85 \times 65\text{mm}$ 晶体
- 探测器灵敏体积 $\sim 1.9\text{kg}$
- 蒙卡相对效率 $\sim 105\%$
- 工作电压 $\sim 3000\text{V}$

Electric Field (Magn.) @ $\phi = 0.0^\circ$



➤ 设计情况:

- 60cm U型冷指探测器
- 分区进行低本底优化:
 - 探测器模组 (近端) - 重点优化, 所有手段降本底
 - 冷指 (近端 - 远端) - 平衡降本底与其他设计考量
 - 液氮杜瓦 (远端) - 采用商用杜瓦
- 近端的设计优化
 - 优化材料选择, 金属材料只使用低本底Cu & Pb, 有机材料通过CJPL-I GeTHU筛选本底合格的材料
 - 电子学采用低本底线缆
 - 信号引出由传统电极针方案改为邦定读出
 - JFET放在尽可能远离晶体的位置, 并进行屏蔽

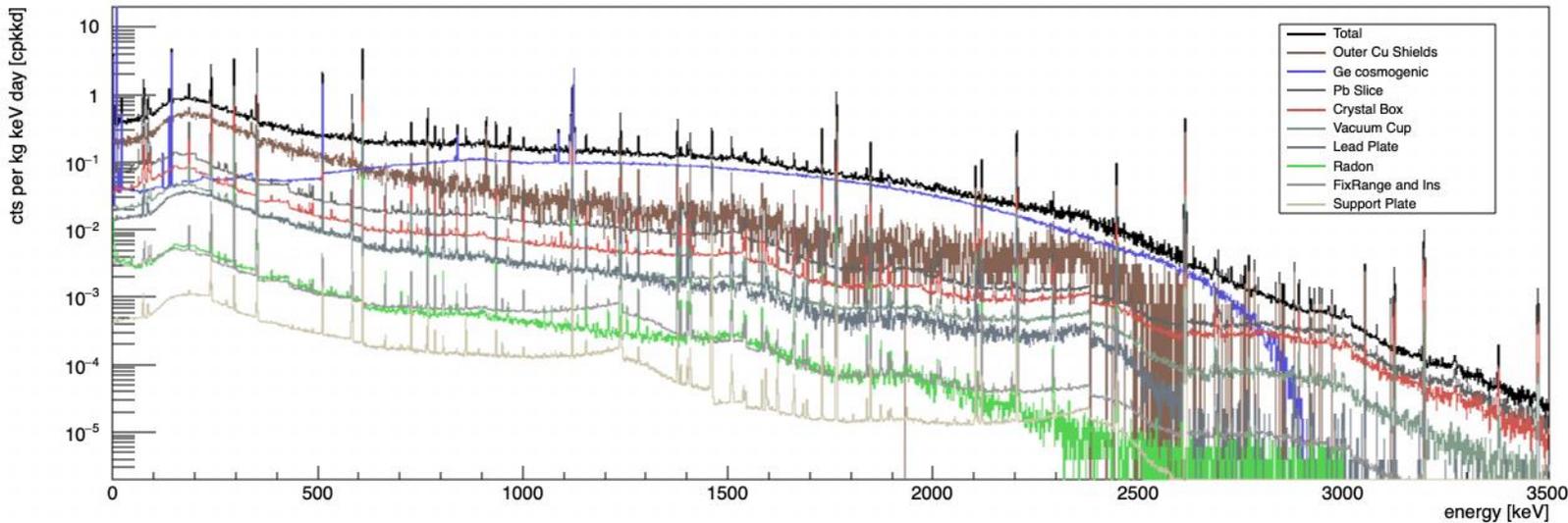


探测器整机蒙卡模拟

➤ 使用Geant4建模，蒙卡模拟得到：

- 积分计数率1024.9cpd@30~2700keV
- 以Φ85x65mm铜样品 (1.8kg) 为例计算，测量30天，最小可探测活度达到mBq/kg量级

材料	蒙卡使用材料放射性活度(mBq/kg)		
	232Th	238U	40K
铜	0.4	1.24	0.003
PTFE	<2.24	<8.65	<54.23
PEEK	<5.33	<5.22	<80.45
蓝宝石	<1.13	<4.76	<36.46



核素	能量 (keV)	本底计数率 (cpd)	MDA (mBq/kg)
232Th	583	9.42	3.51
232Th	2614	2.63	3.04
238U	351	27.32	4.94
238U	609	20.31	4.17
40K	1460	3.38	9.25

➤ 设计阶段的考虑:

- 优化材料选择, 金属材料只使用低本底Cu & Pb, 比如In改用Pb
- 有机材料通过CJPL-I GeTHU筛选本底合格的材料

➤ 研发过程中的情况及应对措施:

- 获取不到低本底老Pb: 电子学屏蔽体改用Cu, In改用Sn (晶体固定方式改变)
- 获取不到德国低本底Cu: 多方寻找资源, 改用国产低本底Cu
- 商用分子筛Ra超标风险高: 多方寻找资源, 改用低本底活性炭 (考虑过采用离子泵方案)
- 电极读出使用的弹簧针本底未知: 改用邦定引出
- 邦定丝与电路板焊接引入本底未知: 改用压接方案

材料	放射性活度(mBq/kg)			判断结果
	232Th	238U	40K	
铜	<0.4	<1.24	<0.003	采用
PTFE	<2.24	<8.65	<54.23	采用
PEEK	<5.33	<5.22	<80.45	采用
蓝宝石	<1.13	<4.76	<36.46	采用
锡	<1.80	<7.29	<64.92	采用
铅	22.02	103.89	112.7	不采用
磷铜弹簧	<10.7	4736	220	不采用
	<11.5	717	255	不采用
	75.9	1050	3628	不采用

表面处理工艺

- 采用工艺：化学刻蚀+电抛光
- 化学刻蚀工艺：
 - 1% H_2SO_4 + 3% H_2O_2 (5min)
 - 1%草酸 (5min)
 - 去离子水清洗
- 电抛光工艺：
 - 电解液：85% H_3PO_4 +5%正丁醛
 - 氮气氛围风干



表面处理前



化学刻蚀后



电抛光后

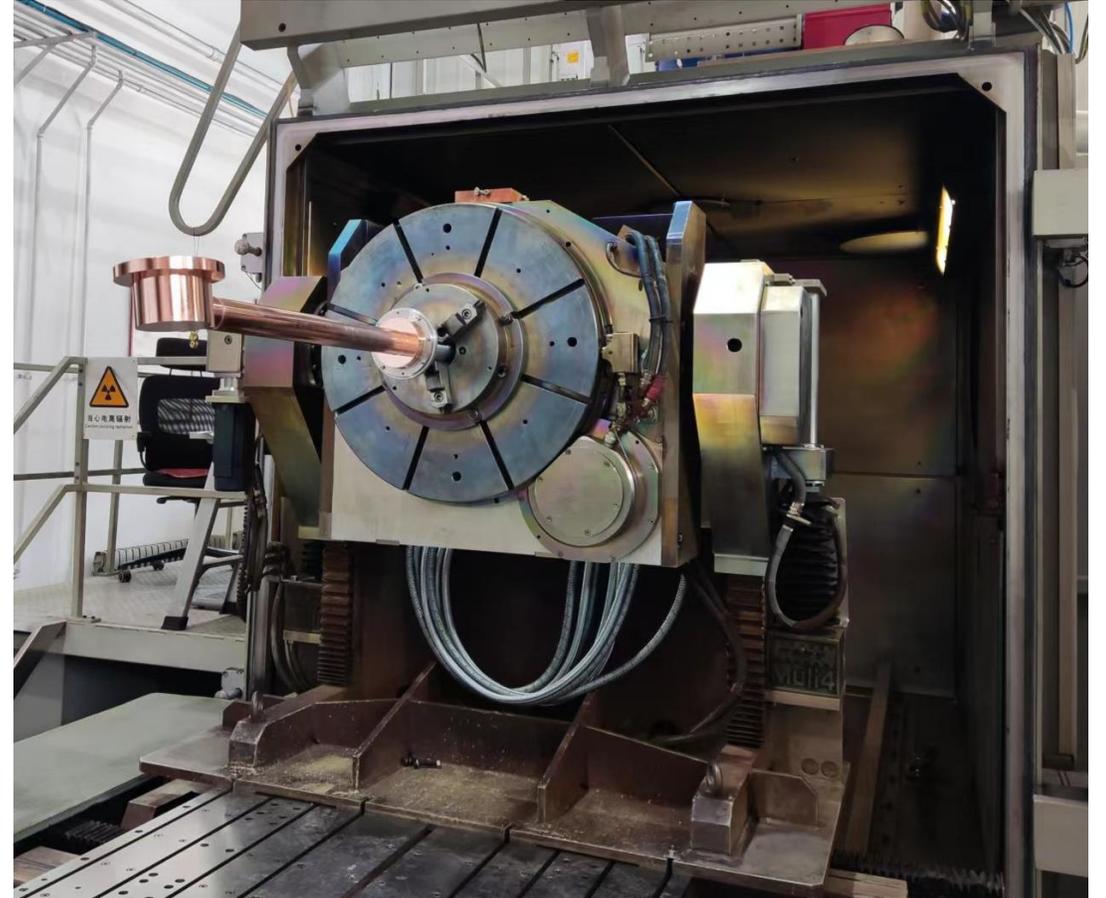
- 化学刻蚀：工艺条件简单，但表面粗糙度较大，本底抑制效果较差
- 电抛光：工艺条件复杂，需制备合适电极，表面粗糙度较好，本底抑制效果好
- 降低高纯铜材料表面的本底同时保证真空/导冷性能



大工件的处理效果 (长度约730mm)

➤ 焊接：

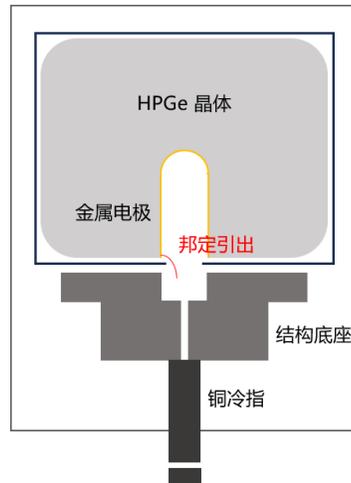
- 探测器设计需求：60cm长U型冷指，该冷指需要焊接（共有3条焊缝）
- 采用电子束焊接工艺，不加料，保证铜材料的低本底特性
- 考虑到大工件表面处理困难，先进行表面处理后再行焊接



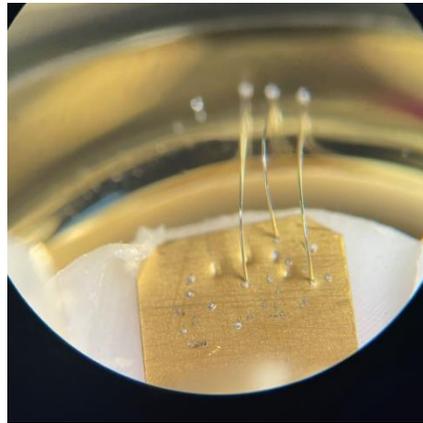
邦定工艺电极引出

- 电极引出所需物料极大减少：
传统弹簧电极针4g，邦定铝丝0.0002g
(直径0.05mm)；
- 相较于传统弹簧针采用合金，邦定所
使用的高纯铝丝本底更低。

材料	放射性活度(mBq/kg)			判断结果
	232Th	238U	40K	
磷铜弹簧	<10.7	4736	220	不采用
	<11.5	717	255	不采用
	75.9	1050	3628	不采用



邦定结构示意图



显微镜下的邦定电极



邦定晶体盒实物图

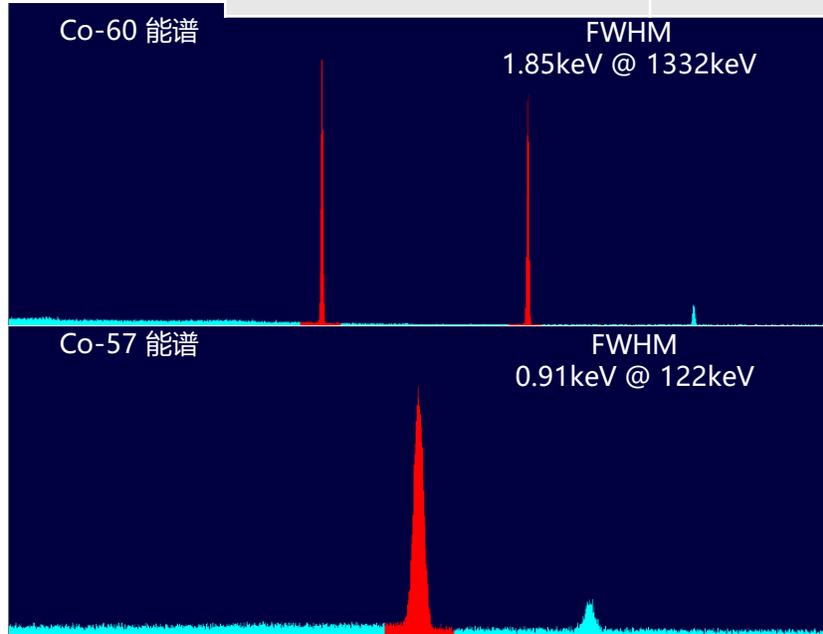
➤ 背景介绍

➤ 设计与工艺

➤ 测试结果及讨论

北京测试

性能指标	技术要求	测试情况	结论
冷指	60cm长U型	60cm长U型	合格
相对探测效率	≥100%	106.0%	合格
能量分辨力	≤2.2keV@1332keV	1.85keV@1332keV	合格
	≤1.4keV@122keV	0.91keV@122keV	合格
低温保持器材料	U/Th含量<0.1ppb	U/Th含量<0.1ppb	合格
MDA	mBq/kg量级	?	?



探测器性能指标



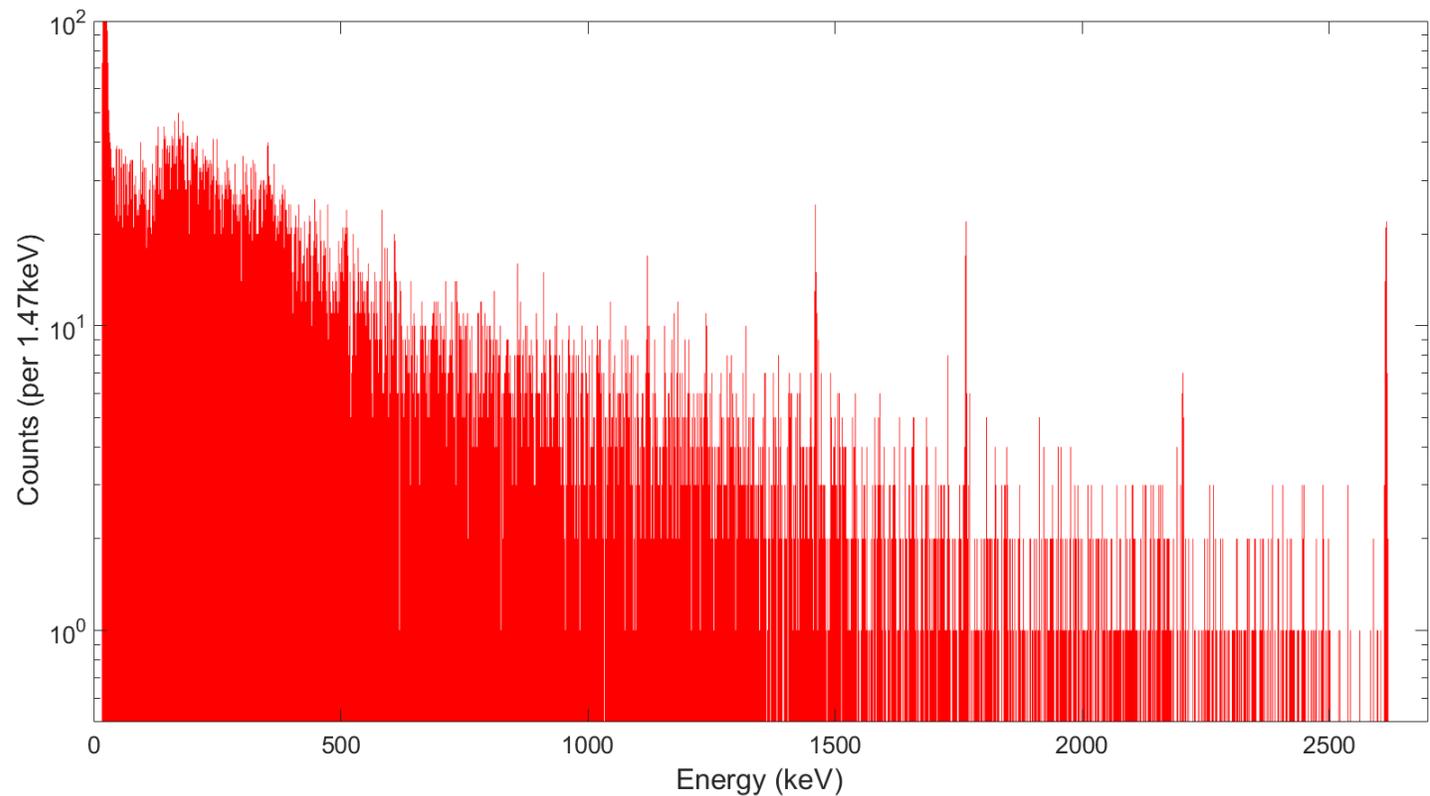
锦屏测试





本底谱情况

- 地点: CJPL-I
- 时间: 2024年1月
- 屏蔽体: 15cm Pb
- 采谱时间: 2天 (172800s)
- 本底计数: 14203 (30keV-3MeV)
- 本底计数率: 0.082 cps
7101 cpd
0.043 cps/kg
3740 cpd/kg



CJPL-I实测本底谱 (2天)

- 以1.8kg铜样品，测量时间30天为例，简单估算MDA
- 每个峰取3倍半高宽区域为ROI，在ROI前后各取1.5倍半高宽区域扣康普顿平台，以上合称总ROI（6倍半高宽）
- 使用近似的MDA公式：

$$L_C = 2.33\sqrt{B}$$

$$L_D = 2.71 + 4.65\sqrt{B}$$

- 其中B为30天的本底计数
- 求得 L_D 后，除以探测效率（蒙卡得到），即可得到MDA

样品特性	数据
样品材料	铜
密度	8.92 g/cm ³
形状	圆柱体
尺寸	Φ85mm × 50mm
质量	2.5kg
放置位置	探测器端盖
测量时间	30天

放射系	核素	能量 (keV)	分支比 (%)	总ROI 计数率 (cpd)	探测效率 (cpd/mBq/kg)	MDA (mBq/kg)
Th-232	Pb-212	238	43.6	73	1.11	6.59
	Tl-208	583	30.54	35	0.69	7.43
	Tl-208	2614	35.84	34.5	0.48	10.60
	Ac-228	911	26.2	26.5	0.53	8.43
	Ac-228	968	15.9	19	0.31	12.04
U-238	Pb-214	351	35.6	84.5	0.90	8.75
	Bi-214	609	45.49	39.5	1.02	5.31
K-40	K-40	1460	10.55	40.5	0.19	29.64

- 探测器的本底计数率是蒙卡结果的7倍，高能部分超出更多 (13倍@2614 vs 4倍@583)
- 探测器的本底计数率是Ge-THU I的9倍 (按Ge质量归一化)
- 测试使用的屏蔽体是15cm的铅，其本底较高；待CJPL-II规划的屏蔽体10cm高纯铜+20cm低本底铅到位后，本底会有进一步下降
- 探测器在锦屏进行过一次修复，影响了邦定结构，可能带来一定本底

➤ 在CJPL-I的屏蔽体中，探测器对U、Th的MDA达到mBq/kg量级

- **成功制备了第一台低本底高纯锗探测器，相对效率达106%，能量分辨力优于商用探测器水平；**
- **在CJPL-I实测本底计数率为7101cpd，对U、Th的MDA达到mBq/kg量级；**
- **筛选了一系列低本底材料，建立了低本底高纯锗探测器的制备流程；**
- **使用化学刻蚀+电抛光进行表面处理，控制表面放射性本底；**
- **使用电子束焊接工艺，降低焊接引入的本底；**
- **使用邦定信号读出，替代传统弹簧针方案，降低信号读出引入的本底；**
- **今年内完成全部5台低本底高纯锗探测器的交付；**
- **预期使用CJPL-II的低本底屏蔽体，进一步降低探测器的本底计数率和MDA水平**



PATH

粒子应用技术创新中心
Particle Application
Technology Innovation Center

谢谢!

本底谱情况

核素系	核素	能量	分支比	ROI cpd	净计数率
Th-232	Pb-212	238.63	43.6	74	<L _C
	Bi-212	727.33	6.65	28.5	<L _C
	Tl-208	583.18	30.54	35	<L _C
	Tl-208	2614.5	35.84	34.5	34.5 ± 4
	Ac-228	911.20	26.2	26.5	<L _C
	Ac-228	968.96	15.9	19	<L _C
U-238	Pb-214	351.93	35.6	84.5	10.5 ± 7
	Bi-214	609.31	45.49	39.5	12.5 ± 4
	Bi-214	1120.29	14.91	33.5	8 ± 3
	Bi-214	1764.49	15.31	30.5	20.5 ± 4
	Bi-214	2204.06	4.92	12.5	5.5 ± 2
K-40	K-40	1460.82	10.55	40.5	23.5 ± 5

核素	能量 (keV)	蒙卡 (cpd)	实测 (cpd)	超出倍数
²³⁸ U	351	27.32	84.5	3.1
²³² Th	583	9.42	35	3.7
²³⁸ U	609	20.31	39.5	1.9
⁴⁰ K	1460	3.38	40.5	12.0
²³² Th	2614	2.63	34.5	13.1
30-2700keV		1024.9	7101	6.9

实测本底计数率与蒙卡结果的比较

CJPL-I 实测本底谱的特征峰计数率
 (总ROI区间计数率 & 净峰计数率)