



Background simulation of a low background gamma ray spectrometer with an array of five germanium detectors

陈继开

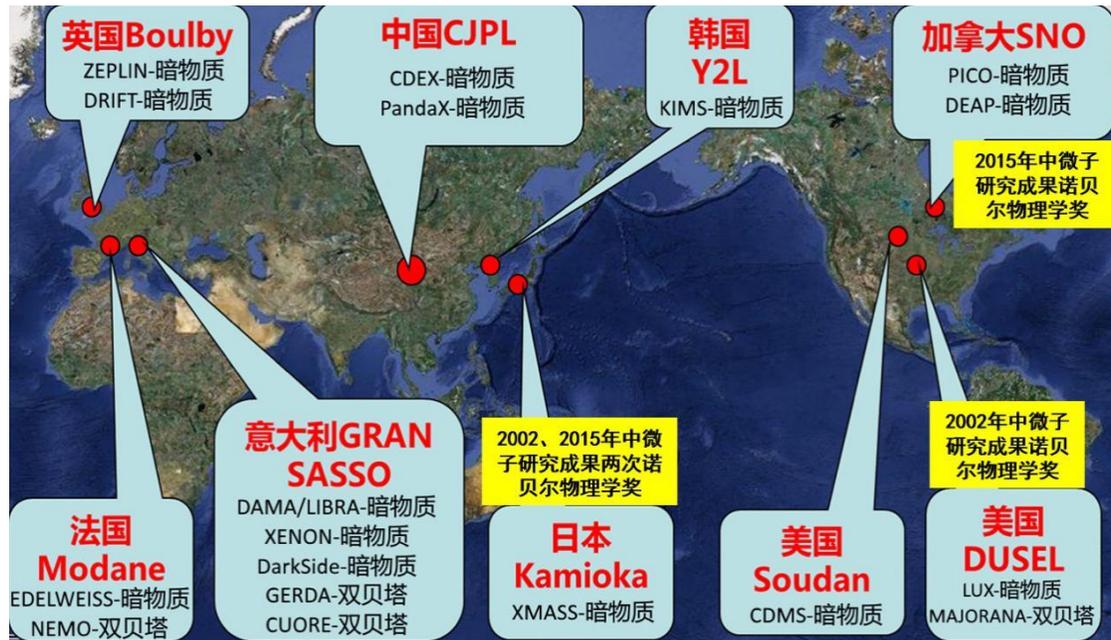
清华大学工程物理系

1. **研究背景和任务**
2. **GeTHU-IV的能谱分解与氦本底分析**
3. **ARGUS的蒙卡模拟**
4. **总结与展望**

1 研究背景

暗物质探测、无中微子双贝塔衰变等**极低本底稀有事例探测实验**

- **降低宇宙射线本底——地下实验室**
- **降低环境辐射本底——复合屏蔽系统**
- **降低实验装置自身本底——材料筛选和本底控制**



国际上主要地下实验室分布



聚乙烯舱结合铅、铜组合屏蔽

暗物质探测、无中微子双贝塔衰变等极低本底稀有事例探测实验

- 降低宇宙射线本底——地下实验室
- 降低环境辐射本底——复合屏蔽系统
- 降低实验装置自身本底——材料筛选和本底控制**

0 $\nu\beta\beta$ 实验组	材料	$^{232}\text{Th}(\mu\text{Bq/kg})$	$^{238}\text{U}(\mu\text{Bq/kg})$	$^{40}\text{K}(\mu\text{Bq/kg})$
GERDA ^{228}Th 和 ^{226}Ra	铜支架	<19	<15	-
	硅支架	$<10^{-3}$	$<10^{-4}$	4.3×10^3
	聚四氟乙烯	30	25	600
MAJORANA	电解铜	<0.112	<0.119	-
	铅块	5.297 ± 5.297	36.076 ± 24.88	-
	聚四氟乙烯	20.78	94.54	-
Lengend	电缆	81 ± 57	107 ± 45	-
	电解铜	0.70 ± 0.32	0.97 ± 0.48	-
	溴苯	25 ± 17	134 ± 4	-
EXO-200	铜低温恒温器	<9.8	<3.2	<12
	铅屏蔽	<150	<50	<600

怎么测量低放射性材料?

电感耦合质谱 (ICP-MS) 气溶胶、存在质谱干扰和基体效应
电感耦合等离子体技术 (ICP) 和质谱计数 (MS) 相结合

中子活化分析 (NAA) 生成放射性核素本底、价格昂贵
用中子轰击样品, 测定核反应瞬发伽马射线或新放射性核素衰变

高纯锗探测器为主的 γ 射线光谱仪
测量周期长、需要极低本底环境
测量放射性核素衰变释放的 γ 射线
如果样品放射性低, MDA为上限

什么是MDA?

1 单探头MDA

L_{DZ} 表示在典型的能谱测量中能够以一定置信水平确定探测到某种放射性核素时其对应的衰变总数 Z (服从高斯分布), **MDA最小可探测活度**表示在典型的能谱测量中能够以一定置信水平确定探测到某种放射性核素时其应有的最小活度值。假设所有置信水平为 $1 - \alpha = 1 - \beta = 95\%$, 本底涨落计数率概率函数曲线分位值 $k_\alpha = 1.645$, 衰变总数概率函数曲线的分位值为 $k_\beta = 1.645$ 。

对于单个探头, 能谱净计数 $\hat{S} = \text{衰变总计数}\hat{Z} \times \text{探测效率}\varepsilon = \text{能谱总计数}\hat{G} - \text{能谱本底计数}\hat{B}$

$$\sigma_{\hat{S}}^2 = \sigma_{\hat{G}}^2 + \sigma_{\hat{B}}^2 = (S + B) + B = S + 2B = \hat{Z} * \varepsilon + 2B$$

$$\hat{Z} = \frac{\hat{S}}{\varepsilon} \quad \sigma_{\hat{Z}}^2 = \frac{\hat{Z}}{\varepsilon} + \frac{2B}{\varepsilon^2}$$

$$L_{DZ} = k_\alpha \sigma_{\hat{Z}=0} + k_\beta \sigma_{\hat{Z}=L_{DZ}} = k_\alpha \sqrt{\frac{2B}{\varepsilon^2}} + k_\beta \sqrt{\frac{L_{DZ}\varepsilon + 2B}{\varepsilon^2}}$$

$$MDA = \frac{L_{DZ}}{m \times t \times I}$$

→ 蒙卡模拟

其中 m 是样品质量, t 是测量时间。

1 多探头MDA

对于独立测量结果的净计数 $[\hat{x}_1 \cdots \hat{x}_n]$, 对应不确定度 $[\hat{\sigma}_1 \cdots \hat{\sigma}_n]$

蒙卡模拟

$$\text{能谱净计数 } \hat{S}_i = \text{衰变总计数 } \hat{Z} \times \text{探测效率 } \varepsilon_i = \text{能谱总计数 } \hat{G}_i - \text{能谱本底计数 } \hat{B}_i$$

通过最大似然法来估计 Z

$$\hat{x}_i \sim \text{Gauss}(u_i = Z \cdot \varepsilon_i, \sigma_i) \quad \sigma_i^2 = S_i + 2B_i = Z \cdot \varepsilon_i + 2B_i \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$P(Z|\hat{x}_1 \cdots \hat{x}_n) = \frac{\exp\left(-\sum \frac{(\hat{x}_i - Z \cdot \varepsilon_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)}{2\pi^{n/2} \prod \sigma_i}$$

$$\frac{\partial P(Z|\hat{x}_1 \cdots \hat{x}_n)}{\partial Z} = 0 \quad \sum \frac{(\hat{x}_i - Z \cdot \varepsilon_i) \cdot \varepsilon_i}{\sigma_i^2} = 0$$

解方程估计 Z 后求解 $\sigma_{\hat{Z}}^2$

$$L_{DZ} = k_\alpha \sigma_{\hat{Z}=0} + k_\beta \sigma \sigma_{\hat{Z}=L_{DZ}}, \quad MDA = \frac{L_{DZ}}{m \times t \times I}$$

1 MDA公式应用于两组数据

考虑2个探头，探测效率 ε_1 和 ε_2 ，本底为 B_1 和 B_2 ，衰变总计数 Z

能谱净计数 $\hat{S}_i =$ 衰变总计数 $\hat{Z} \times$ 探测效率 $\varepsilon_i =$ 能谱总计数 $\hat{G}_i -$ 能谱本底计数 \hat{B}_i

$$\frac{\partial P(Z|\hat{x}_1, \hat{x}_2)}{\partial Z} = 0 \quad \frac{(\hat{x}_1 - Z \cdot \varepsilon_1) \cdot \varepsilon_1}{\sigma_1^2} + \frac{(\hat{x}_2 - Z \cdot \varepsilon_2) \cdot \varepsilon_2}{\sigma_2^2} = 0 \quad \sigma_i^2 = Z \cdot \varepsilon_i + 2B_i$$

$$\hat{Z} = \frac{\sigma_1^2 \varepsilon_2 \hat{x}_2 + \sigma_2^2 \varepsilon_1 \hat{x}_1}{\sigma_2^2 \varepsilon_1^2 + \sigma_1^2 \varepsilon_2^2} = \frac{(Z\varepsilon_1 + 2B_1)\hat{x}_2 \varepsilon_2 + (Z\varepsilon_2 + 2B_2)\hat{x}_1 \varepsilon_1}{(Z\varepsilon_2 + 2B_2)\varepsilon_1^2 + (Z\varepsilon_1 + 2B_1)\varepsilon_2^2}$$

$$\sigma_{\hat{Z}}^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_2^2 \varepsilon_1^2 + \sigma_1^2 \varepsilon_2^2} = \frac{(Z\varepsilon_1 + 2B_1)(Z\varepsilon_2 + 2B_2)}{(Z\varepsilon_2 + 2B_2)\varepsilon_1^2 + (Z\varepsilon_1 + 2B_1)\varepsilon_2^2}$$

$$L_{DZ} = k_\alpha \sqrt{\frac{2B_1 B_2}{B_2 \varepsilon_1^2 + B_1 \varepsilon_2^2}} + k_\beta \sqrt{\frac{(L_{DZ} \varepsilon_1 + 2B_1)(L_{DZ} \varepsilon_2 + 2B_2)}{(L_{DZ} \varepsilon_2 + 2B_2)\varepsilon_1^2 + (L_{DZ} \varepsilon_1 + 2B_1)\varepsilon_2^2}}$$

如果取 $B_2 = 0$ $\varepsilon_2 = 0$ $L_{DZ} = k_\alpha \sqrt{\frac{2B_1}{\varepsilon_1^2}} + k_\beta \sqrt{\frac{L_{DZ} \varepsilon_1 + 2B_1}{\varepsilon_1^2}}$ 与直接推导单探头MDA公式相同

1 研究背景

国际上高纯锗探测器性能

探测器	地点	Ge 质量/kg	1332 keV 能量分辨率/keV	相对探测效率/%	60-2700 keV 本底计数率/kg/day
GeMPI		2.2	2.3	102%	71±1 ^a
GeMPI3	LNGS	2.2	2.2	98.70%	24±1 ^a
Gator		2.2	1.98	100.50%	89±0.7
Roseberry ^d		1	1.58	-	181.1
Belmont	BUGS	3.2	1.92	160.00%	135.0
Merrybent		2	1.87	100.00%	167.4
Maeve	BHUC	2	3.19	85.00%	956.1
Ge-14 ^e	HADES	2.57	~1.9	-	208±5
TU1	Felsenkeller	3.06	2	163%	116±1
Ge-III	Alabama	2.2	2.71	105.00%	8600
GeOroel	LSC	2.2	1.85	109.00%	165.3
GeMSE	LVdA	2	1.96	107.70%	82±1 ^b
GeTHU	CJPL	0.9	2.04	40%	905.7 ^a
GeTHU4		2.48	~2	120%	211.4 ^b
OBELIX	LSM	3.2	~2	160.00%	74 ^c
CAGe	Y2L	-	~2	70%	90.4±0.3

晶体质量普遍为2kg, 约100%相对探测效率, 可大于3kg

分辨率1332keV为2keV附近

本底计数率普遍在100-200/kg/day区间, 部分能低于100/kg/day, 最低为24/kg/day (0.009cpk/d)

对应125kg铜样品测量100天
MDA<100μBq/kg

建造CJPL的低本底测量装置

a为40-2700keV b为100-2700keV c为30-3000keV
d为BEGe探测器 e为SAGe小阳极锗

2 CJPL-I的低本底伽马谱仪——GeTHU

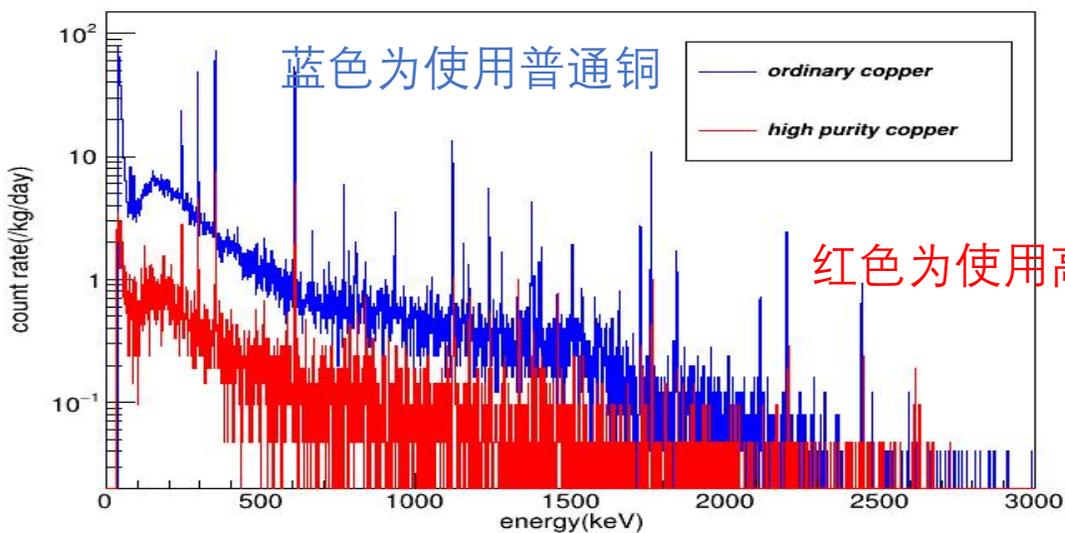


地下实验室一期低本底装置
GeTHU系列谱仪



GeTHU-IV谱仪

2021年GeTHU-IV屏蔽升级
使用聚乙烯、铅、铜复合屏蔽
2022年2月GeTHU-IV
更换普通铜为高纯铜（本底更低）
2022年7月GeTHU-IV
加工圆柱体铜，将内部空间尽量用
铜填满，减少氦本底



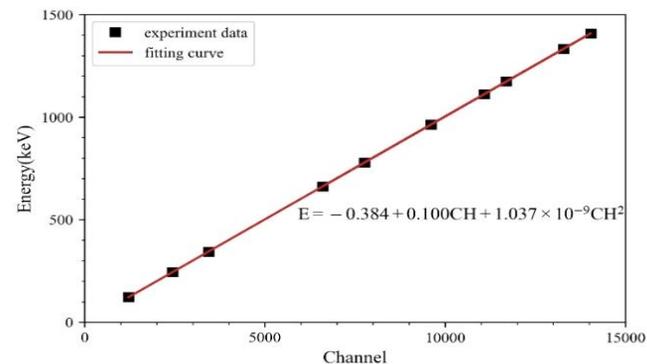
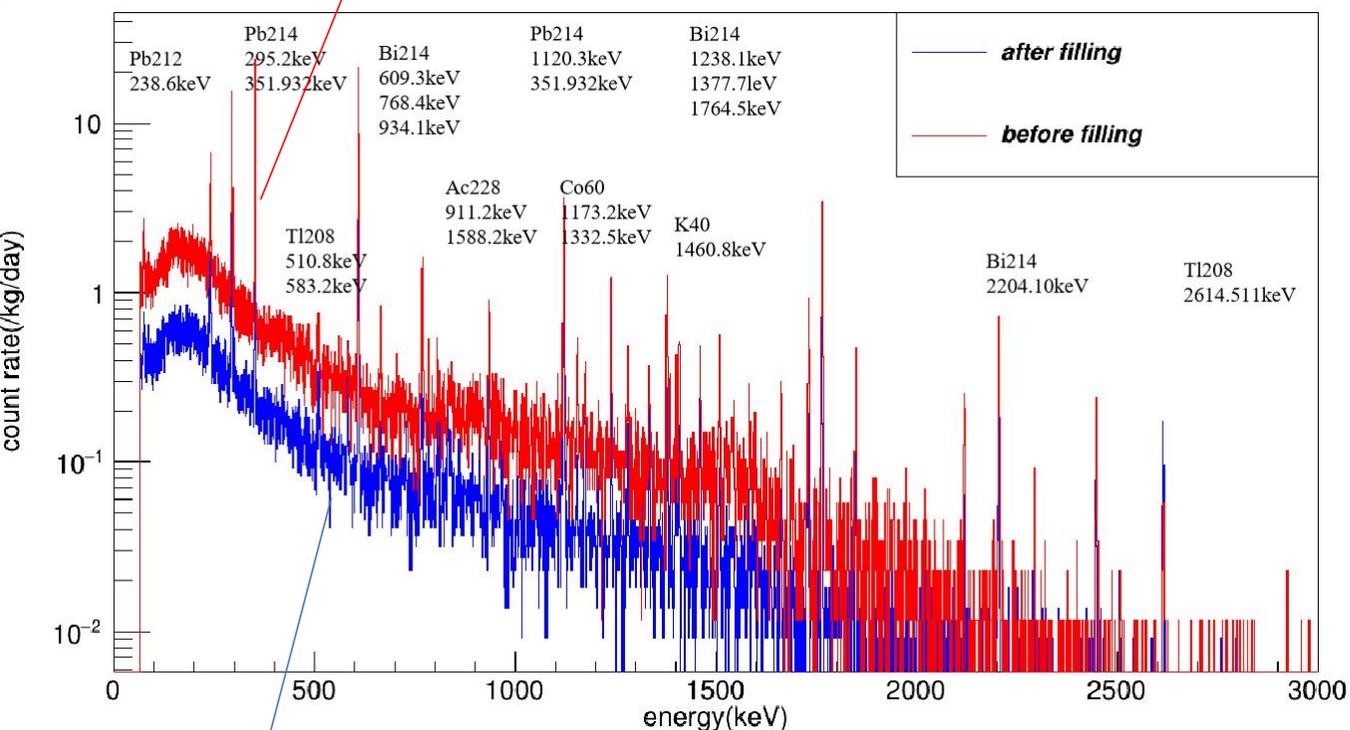
GeTHU-IV采数起止日期	屏蔽情况
2021.05.14—2021.10.16	铜使用普通铜
2022.02.26—2022.07.10	铜使用高纯铜
2022.08.01—2023.02.19	内部铜填满

普通铜更换为高纯铜
本底降低至400cpkd (100-2730keV)
世界最低水平为24cpkd

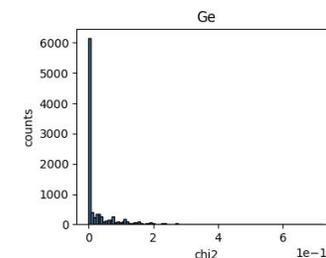
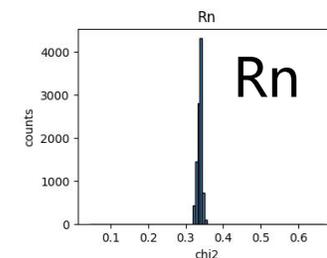
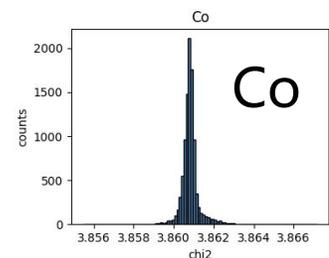
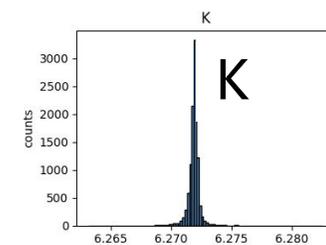
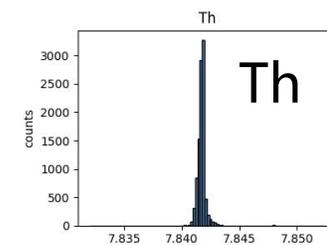
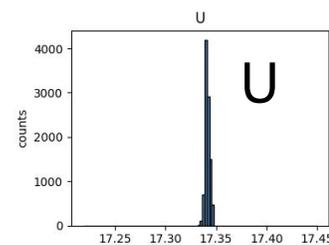
2 GeTHU-IV的本底测量和数据处理

本底主要来自于U、Th、⁴⁰K、⁶⁰Co、Rn

红色为填充铜前 本底大部分来自空腔内氦



能量刻度曲线



蓝色为填充铜后
氦本底大幅度降低

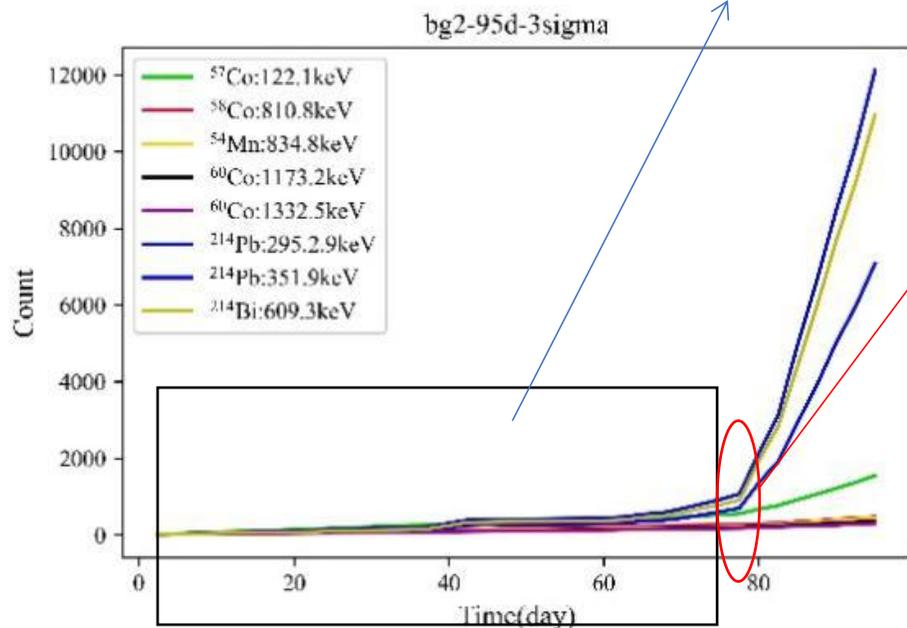
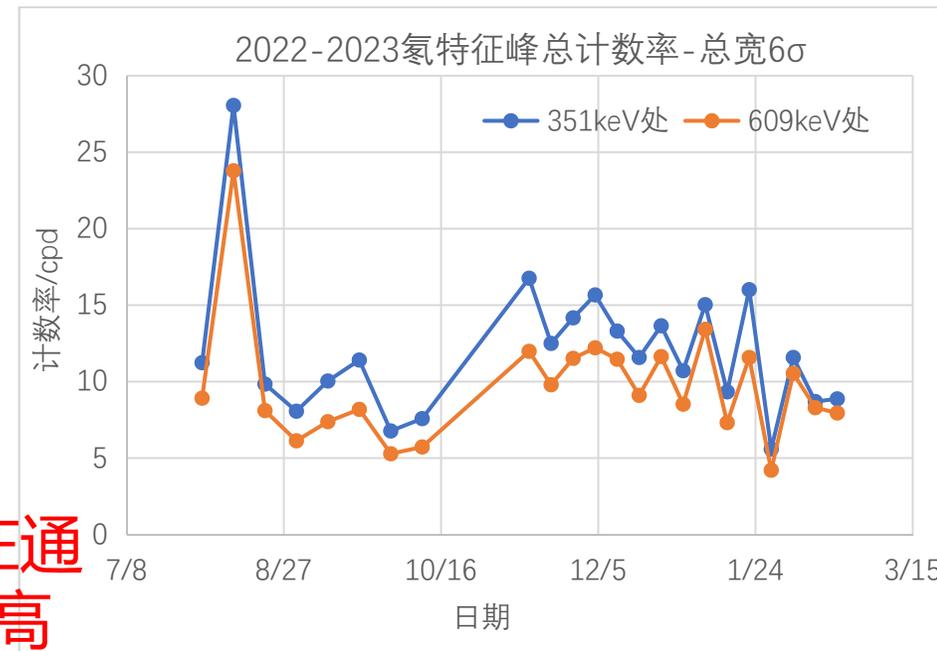
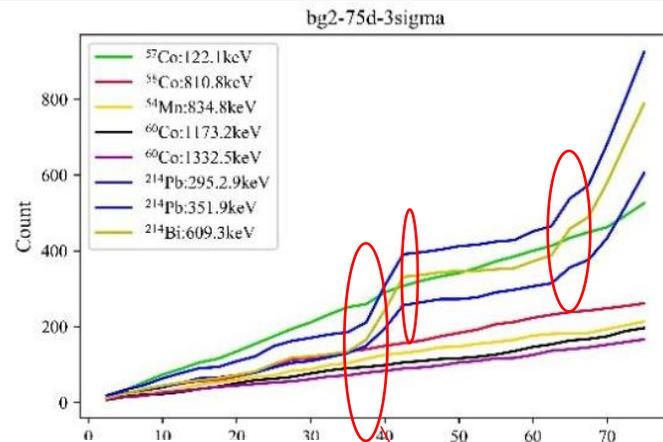
实测本底能谱

真空腔本底降低至200cpkd

使用拟合对实测谱能谱分解
Ge中宇生核素本底很低

2 GeTHU-IV的氡本底分析

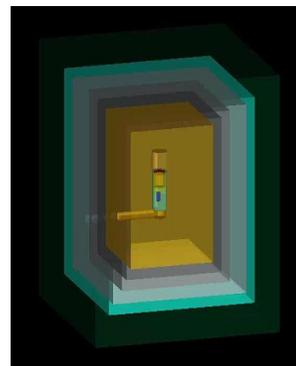
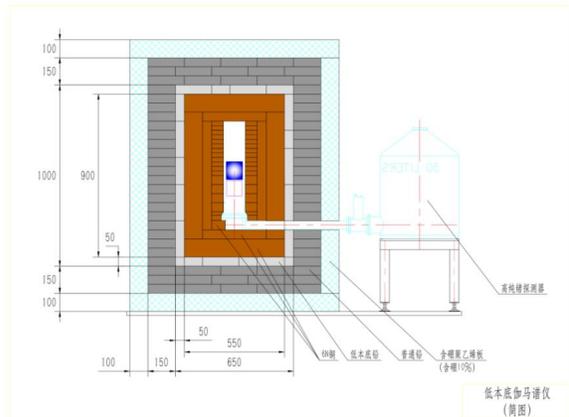
不同能峰计数变化97.75天
2020.10.16-2021.2.24
右上为前75天计数变化



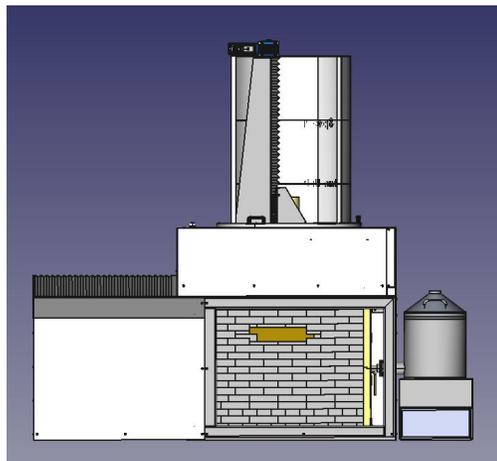
氡的特征峰计数在通
风异常时急速升高
其他特征峰计数平稳

GeTHU-IV氡本底高，受外界环境影响大
GeTHU-IV空间小无法直接测量氡浓度
使用实测谱和蒙卡模拟对比分析氡浓度

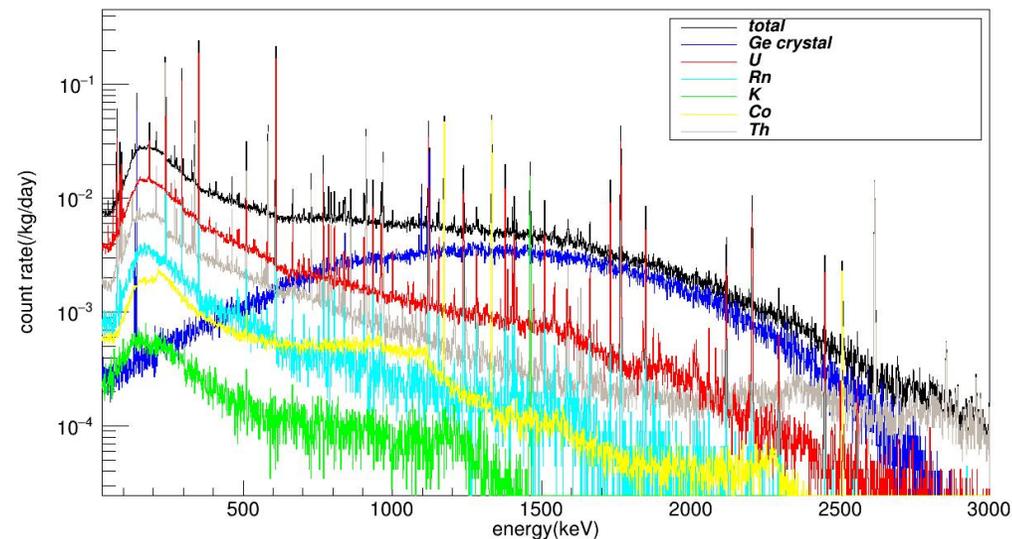
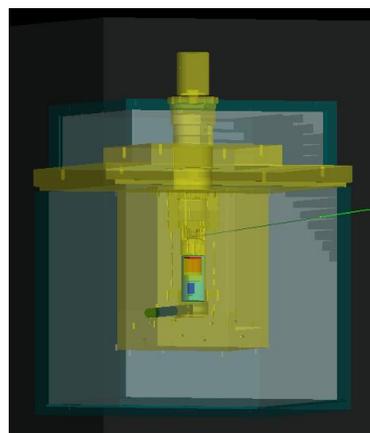
2 GeTHU-IV的蒙卡模拟



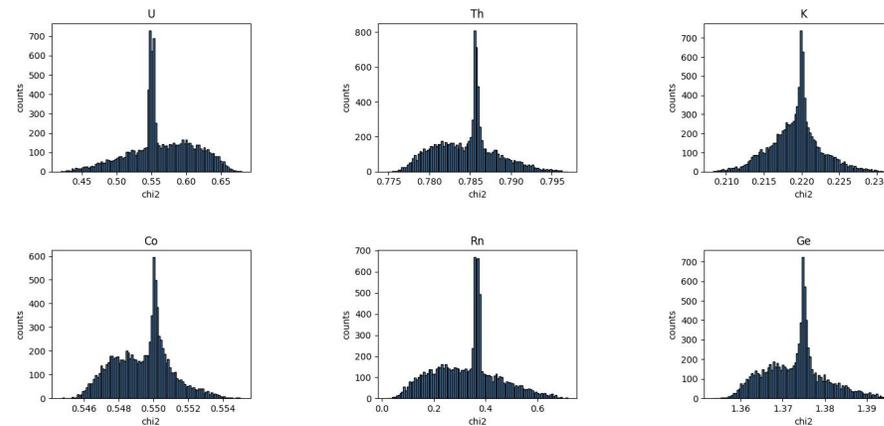
根据设计图纸构建模型
(是否填满铜分开模拟)



根据加工文件精准构建模型



按核素模拟能谱



使用模拟谱检验能谱分解准确性

2 GeTHU-IV氡浓度和MDA估算

能量 (keV)							
计数率 ($\text{kg}^{-1}\text{day}^{-1}$)	238.632	351.932	583.187	609.320	911.204	1460.80	60-2700
模拟谱 ²²² Rn 20Bq/m ³	1.187	12.364	0.420	11.798	0.237	0.219	225.329
实测谱	3.296	11.461	1.317	9.071	0.633	1.071	250.125
备注说明	Th可能 低估	主要来 自Rn- 222		主要来 自Rn- 222			K-40可 能低估

本底计数率:

氡浓度模拟参数为20Bq/m³时
模拟谱与实测谱较为接近, 此时
超过90%的本底来自于氡
氡以外本底<20cpkd(100-
2730keV)

MDA	²³⁸ U (609)	²³² Th (238)	⁴⁰ K (1460)
GeTHU-4德国铜屏蔽圆柱体 D=H=70mm(Cu 2.40kg 30day)	4.68 mBq/kg	2.35 mBq/kg	10.29 mBq/kg
GeTHU-4普通铜屏蔽圆柱体 D=H=70mm(Cu 2.40kg 30day)	15.76 mBq/kg	5.47 mBq/kg	10.51 mBq/kg

估算MDA在mBq/kg量级
可实现mBq/kg量级测量

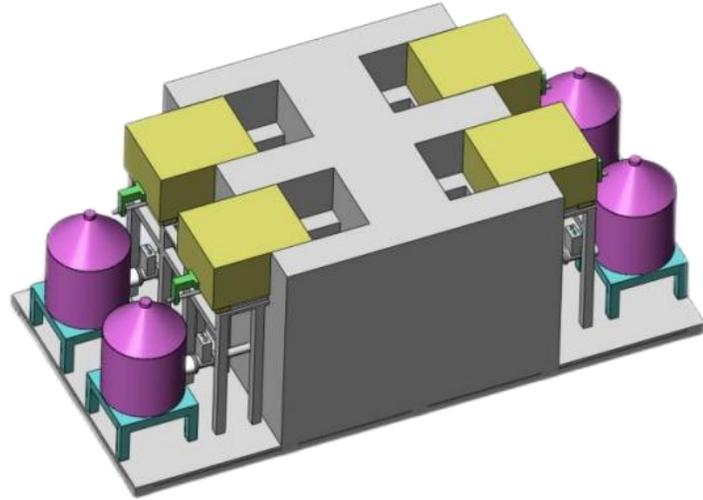
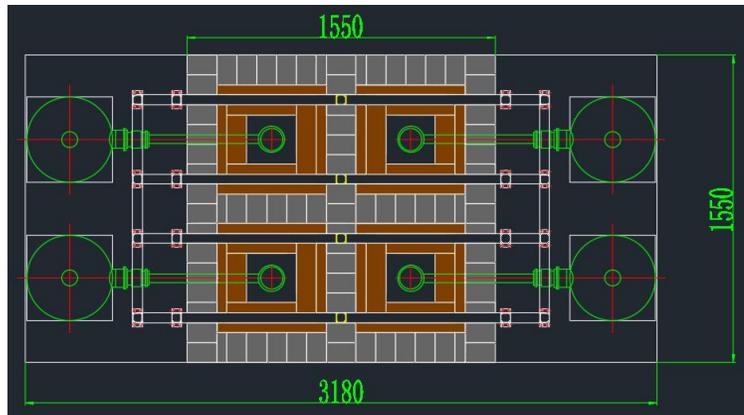


示意图 一组4个探测器



俯视图 一组4个探测器

低本底测量装置计划包含新建设15台mBq/kg量级谱仪

探测效率：改变样品形状、大小和材料

本底水平：考虑锆宇生核素、探测器内元件、铅铜屏蔽、氡本底（降低至 0.1Bq/m^3 ）等

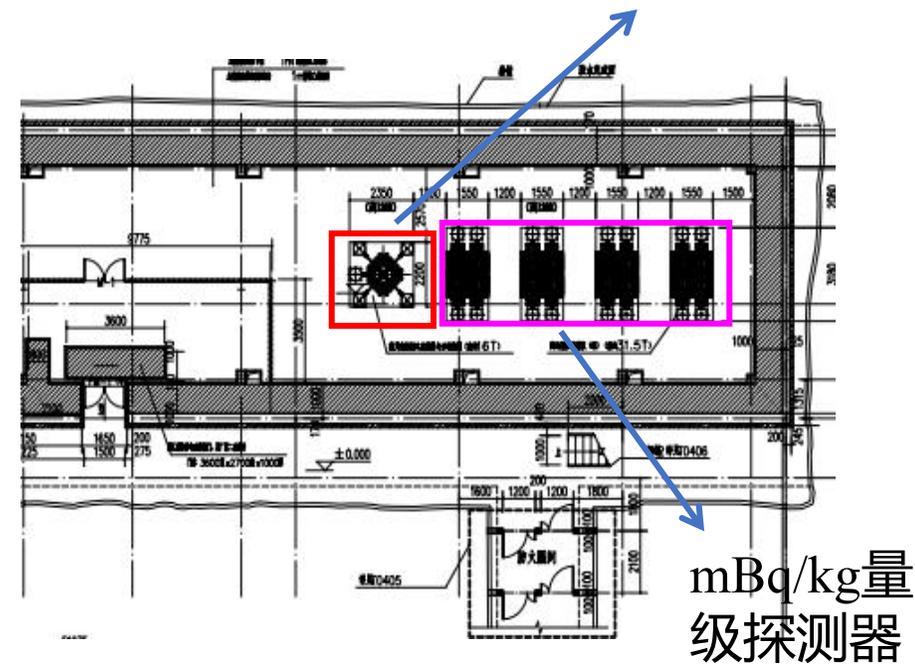
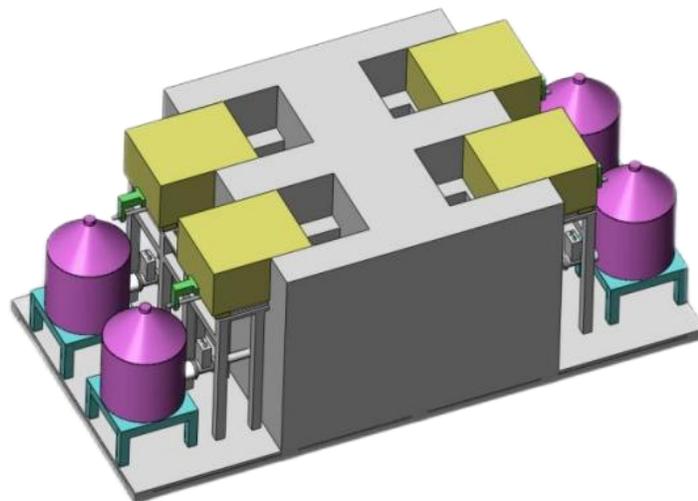
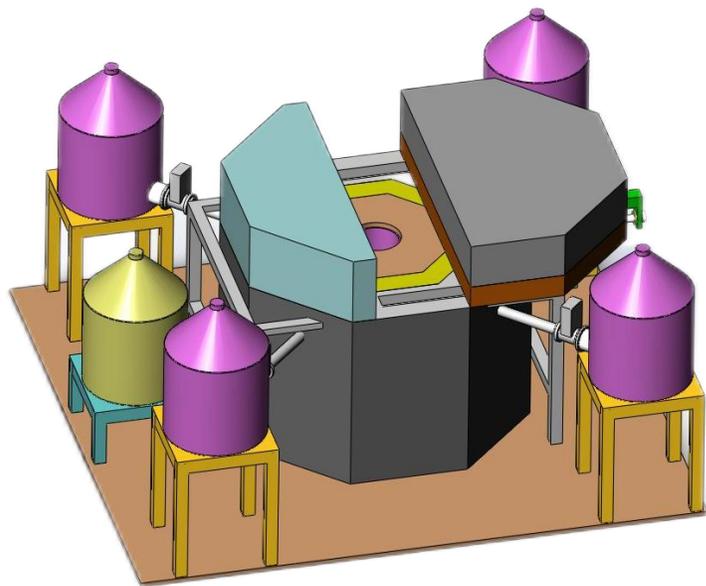
样品	30天 MDA(mBq/kg)	^{238}U (609keV)	^{232}Th (238keV)	^{40}K (1460keV)
Cu 圆柱体 D=H=70mm 2.40kg	冷却3年 $^{222}\text{Rn}=0.1\text{Bq/m}^3$	1.22	0.56	2.00

系统指标：MDA小于10.0 mBq/kg

3 $\mu\text{Bq}/\text{kg}$ 量级谱仪——ARGUS

只有 mBq/kg 的测量能力是不够的！电解铜活度已经可以小于 $1\mu\text{Bq}/\text{kg}$ ！
建立起一套 $\mu\text{Bq}/\text{kg}$ 量级辐射本底测量与分析装置ARGUS (a new ARray of Germanium γ -ray Spectrometer), 和多套 mBq/kg 量级谱仪。
作为极低本底分析测试平台组成部分, 放置在CJPL聚乙烯屏蔽仓内

ARGUS



ARGUS装置外观示意图

mBq/kg 量级谱仪外观示意图

聚乙烯屏蔽仓放置位置

3 ARGUS设计构思 增大探测效率，降低本底

5个P型同轴高纯锗探测器

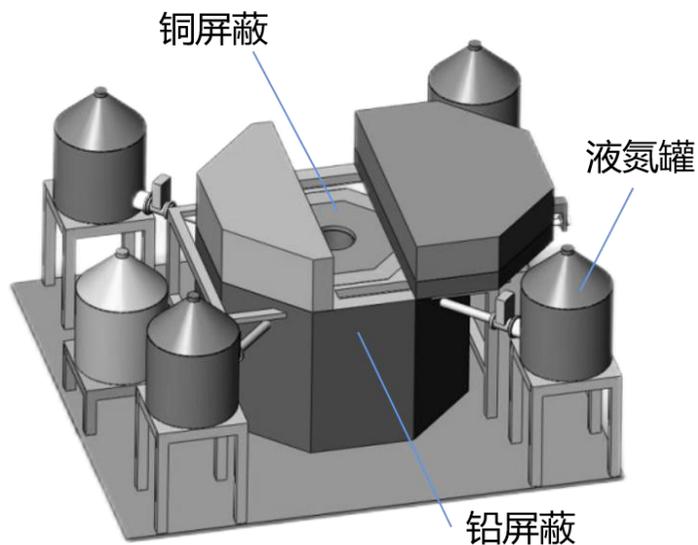
4个为水平冷指

1个为U型冷指

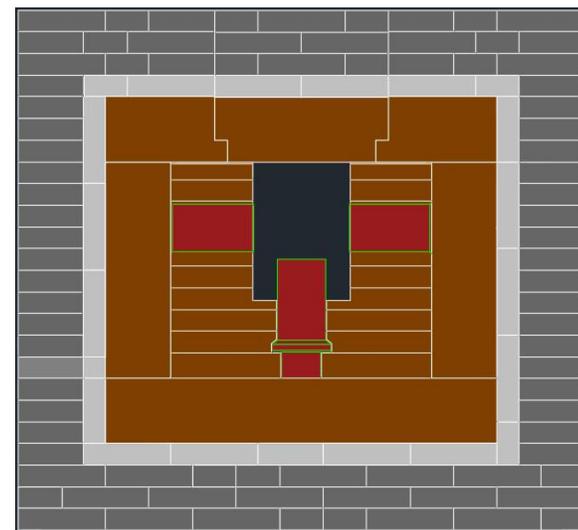
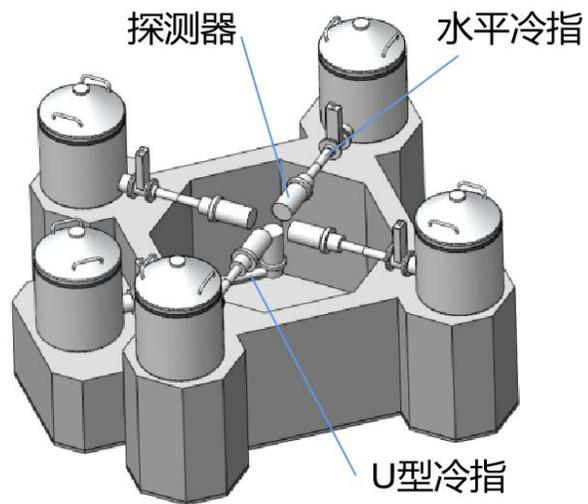
屏蔽体形状均为正八边体，模拟结果选择普通

铅（国标一号）15cm，低本底铅（进口老铅）

5cm，剩余为高纯无氧铜（4N高纯铜）。

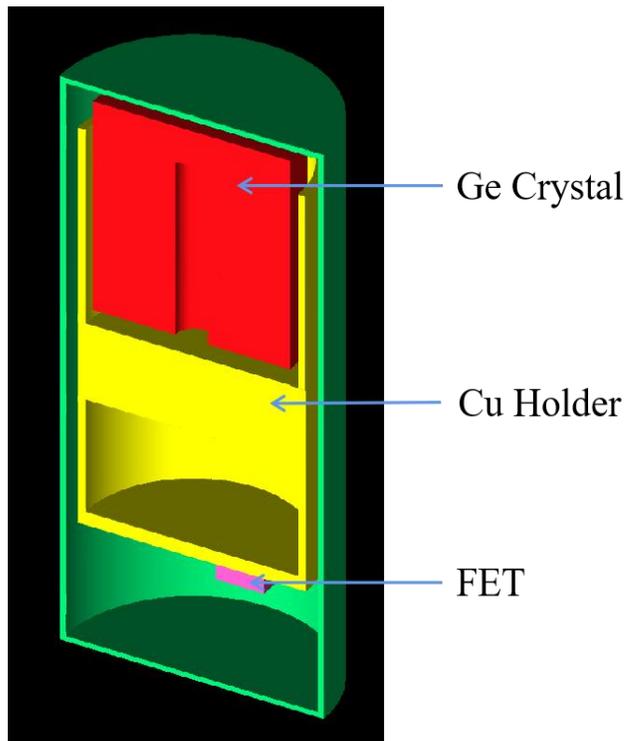


探测器阵列系统



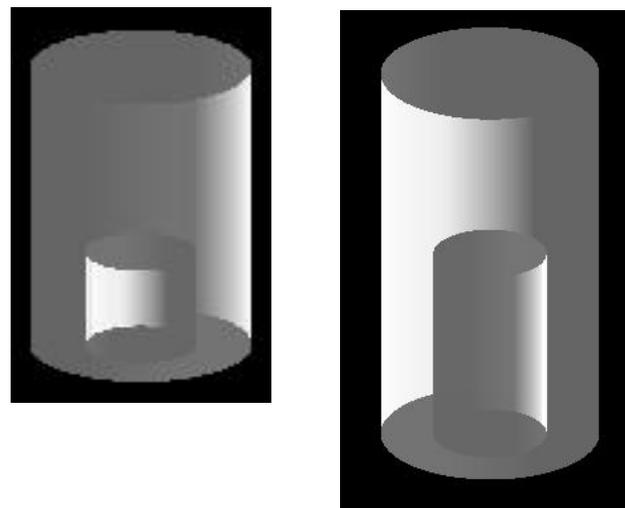
复合屏蔽系统

3 ARGUS的蒙卡模拟



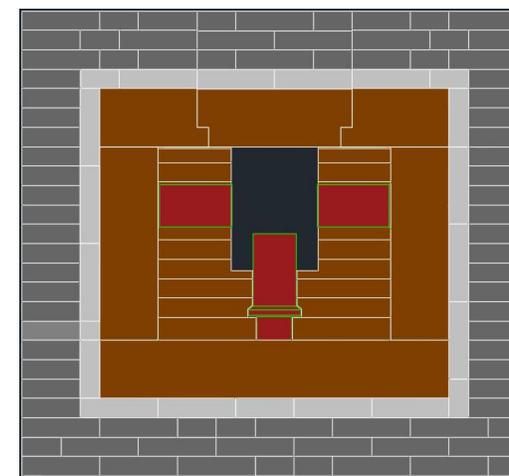
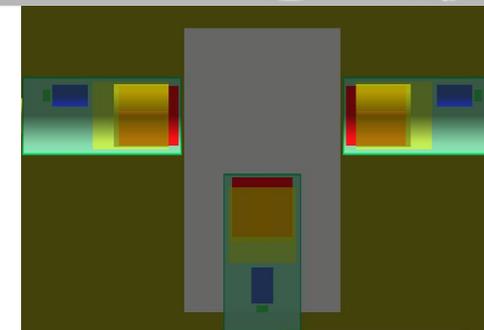
探测器几何

1. 场效应管FET及铜支架尺寸
2. 冷指方向及冷指缝影响
3. Ge晶体空间位置及死层厚度影响



样品几何

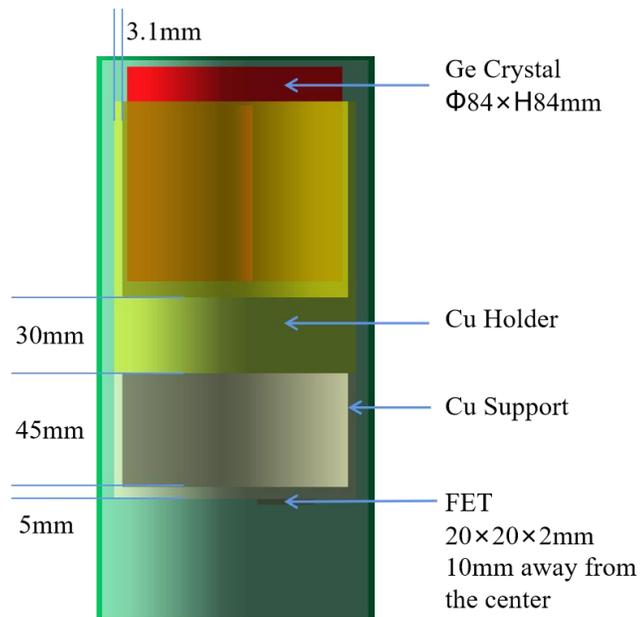
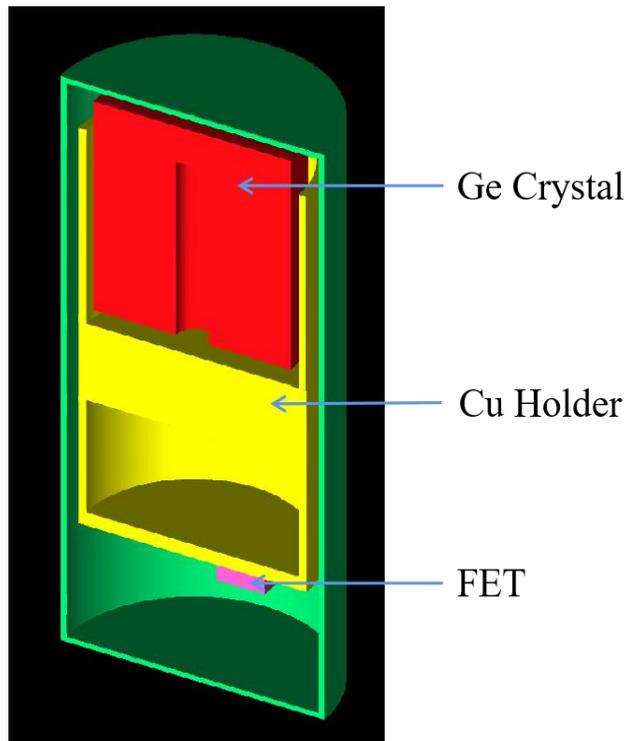
1. 比较长方体、圆柱体样品
2. 不同尺寸、质量、材料
3. 不同样品中源项模拟



复合屏蔽几何

1. 不同材料组合
2. 不同厚度和形状
3. 内部空腔填满铜设计
4. 不使用低本底铅的模拟
5. 外部岩石混凝土本底模拟

3 探测器几何



部分模拟比较:

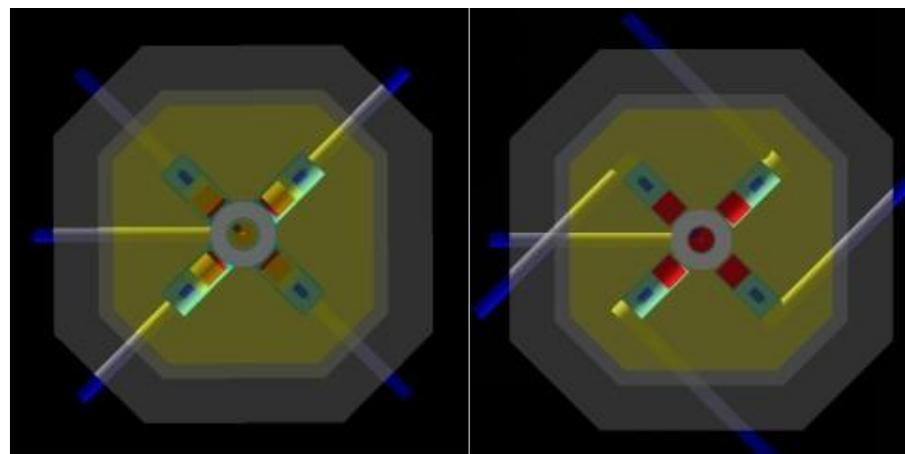
Holder加厚处使用铜铅组合

低温恒温器使用Al还是Cu

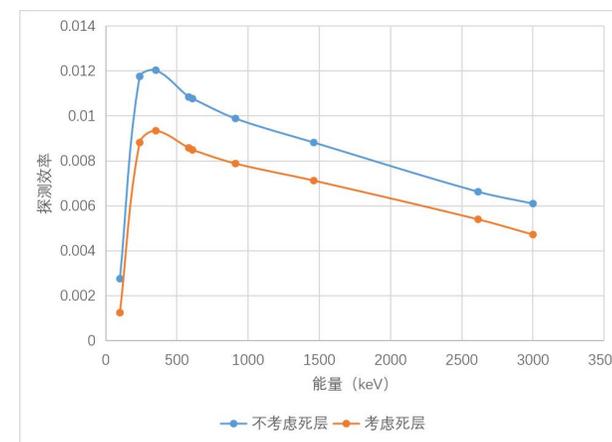
FET不同位置调研拟合

探测器几何

1. 场效应管FET及屏蔽
2. 冷指方向及冷指缝影响
3. Ge晶体空间位置及死层厚度影响

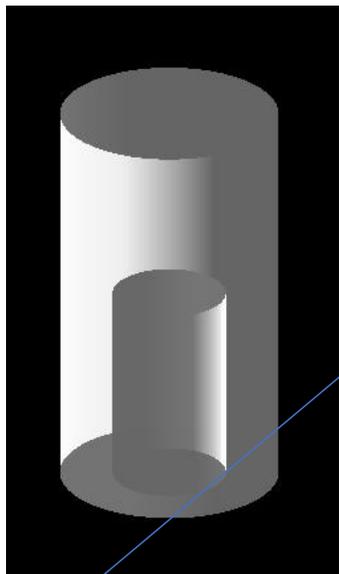


冷指设计优化及冷指缝模拟

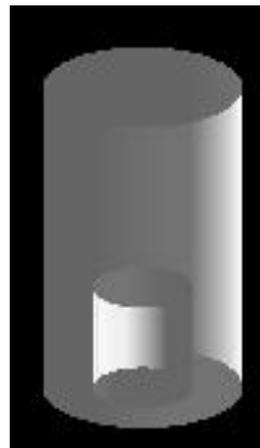


Ge晶体死层模拟

3 样品几何

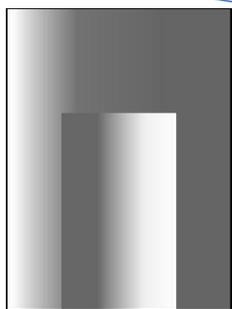


已模拟直径更小的样品，效率更低

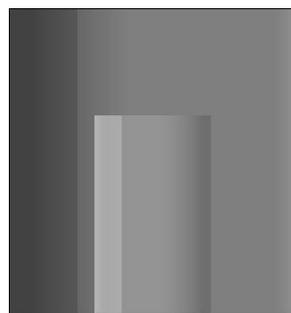


D=220mm H=400mm 中挖孔
D=114mm H=200mm 118.2kg

D=210mm H=300mm 中挖孔
D=114mm H=100mm 92.98kg



和探测器保持2mm距离



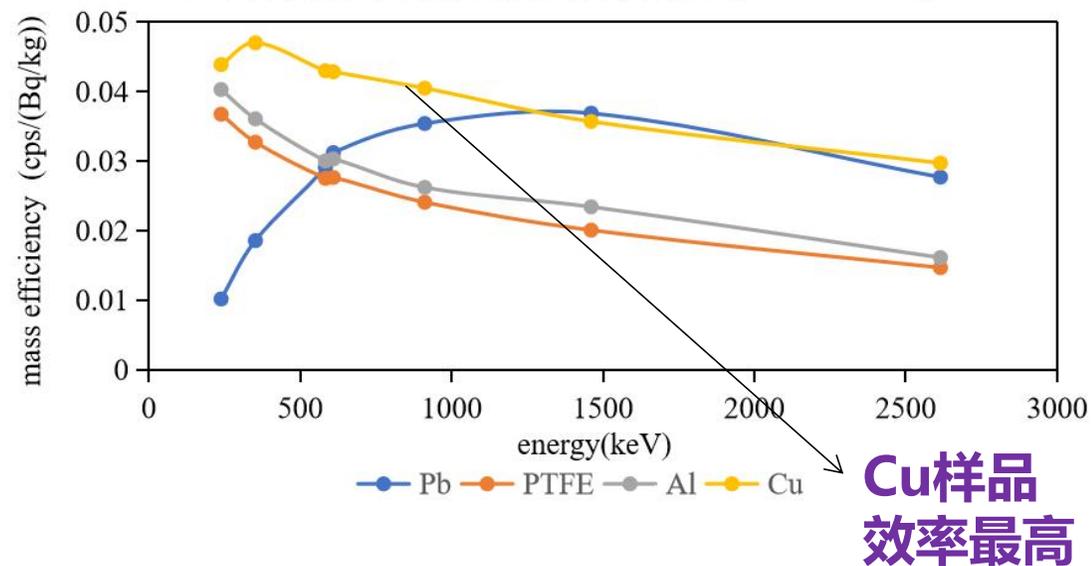
D=220mm H=300mm 中挖孔
D=114mm H=200mm 84.5kg

D=280mm H=300mm 中挖孔
D=114mm H=200mm 147.4kg

样品几何

1. 比较长方体、圆柱体、马林杯样品
2. 不同尺寸、质量、材料
3. 不同样品中源项模拟
4. 样品腔的填充

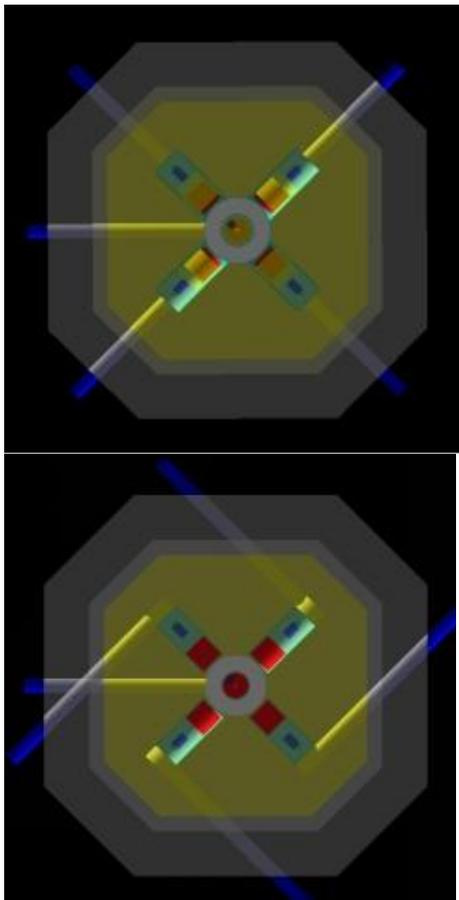
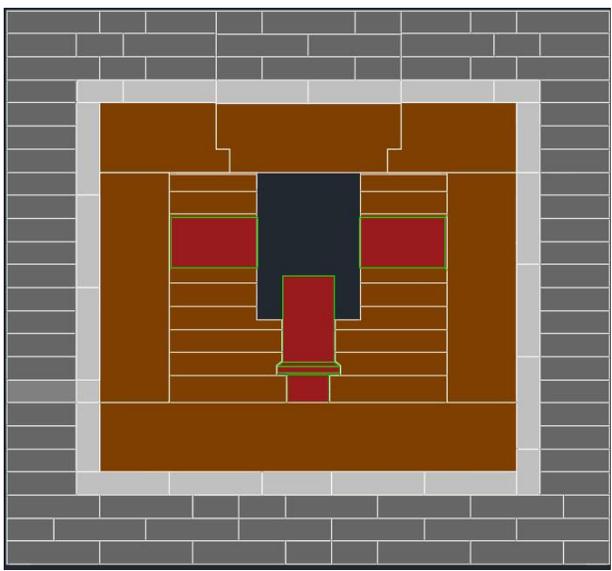
单个探测器不同材料质量探测效率(D/H120mm)



Cu样品效率最高

马林杯放置示意图

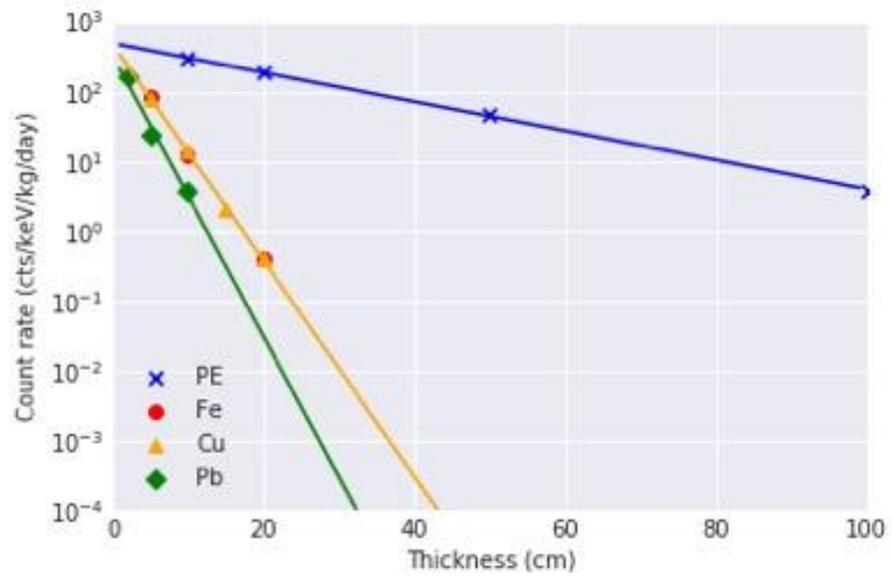
3 屏蔽体几何



- 复合屏蔽几何
- 1.不同材料组合
 - 2.不同厚度和形状
 - 3.内部空腔填满铜设计
 - 4.不使用低本底铅的模拟
 - 5.外部岩石本底模拟

不同冷指设计下的屏蔽

- 形状模拟，包括圆柱、立方等，考虑材料用量、加工要求、屏蔽效果，**选择八面体结构**
- 屏蔽外部本底，单一材料铅厚度大约需要32cm，铜厚度大约43cm，而聚乙烯厚度约350cm
- 多种复合结构比较
- 复合屏蔽为聚乙烯1m，普通铅15cm，低本底铅5cm，剩余为高纯无氧铜且最薄弱处至少15cm



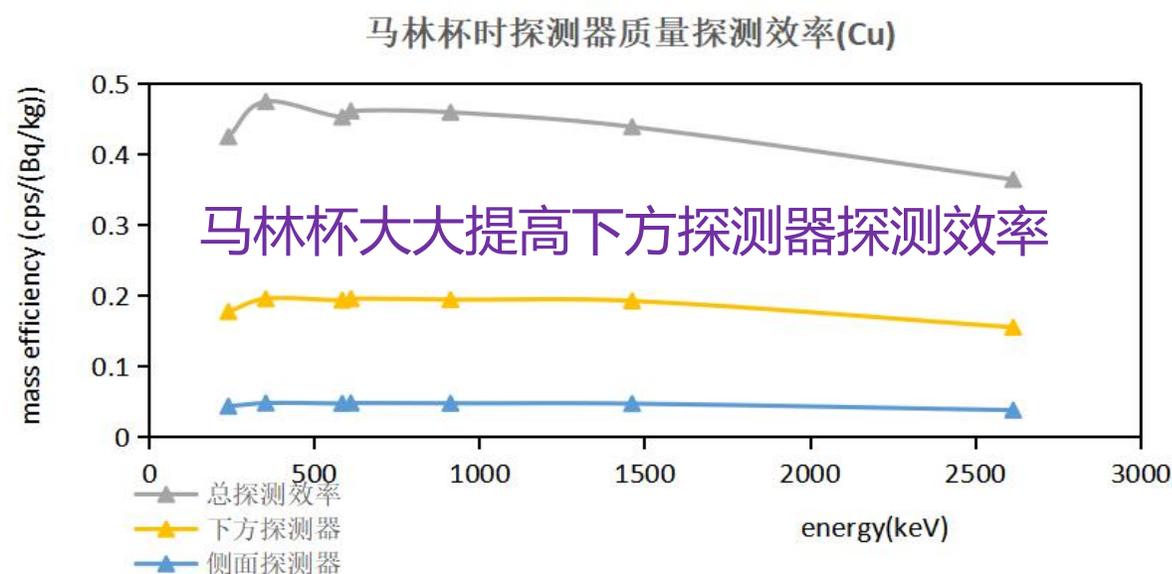
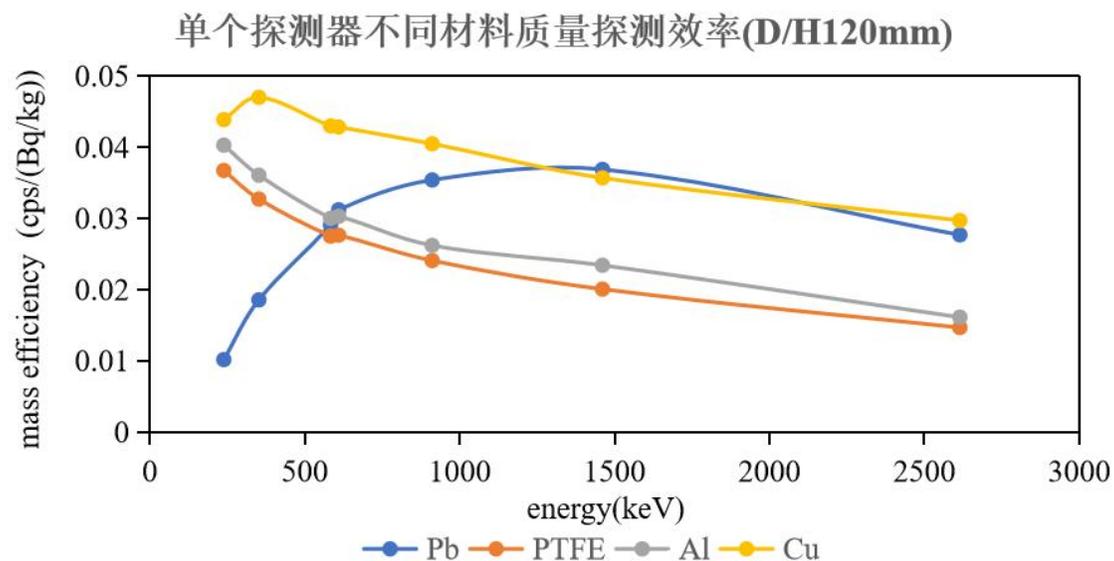
单一屏蔽材料40-2700keV外部本底计数率

3 探测效率模拟

源项为不同尺寸圆柱体或马林杯，使用不同材料样品，源项类型为不同能量gamma射线

衰变链	^{238}U			^{232}Th			
核素	Pb-214	Bi-214	Pb-212	Tl-208	Ac-228	Tl-208	K-40
能量 (keV)	351.932	609.32	238.632	583.187	911.204	2614.511	1460.80
发射强度	35.60%	45.49%	43.60%	30.54%	25.80%	35.75%	10.66%

源项gamma射线设置



3 本底水平-源项设置

对不同放射性活度模拟，按如下活度(mBq/kg)，给出本底能谱结果

不同部件活度(mBq/kg)	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	⁶⁰ Co	²¹⁰ Pb
铜屏蔽 ^[1]	0.070	0.021	0.023	0.002	
低本底铅屏蔽 ^[2]	1.2	0.41	0.31		6000
普通铅屏蔽 ^[2]	1.2	0.41	0.31		100000
探测器铜外壳及支架 ^[1]	0.070	0.021	0.023	0.002	
FET ^[3]	10.57	8.63	5.57		

ROI取宽度为单边 3σ ，能谱展宽选择实测能谱函数(来自原型机GeTHU-4)为

$$\sigma = 0.02473 \times \sqrt{E} - 0.02319$$

[1]E. Aprile, K. Arisaka, F. Arneodo, et al., Material screening and selection for XENON100. *Astropart. Phys.* 35, 43-49(2011).

[2]V. Alvarez, I. Bandac, A. Bettini, et al., Radiopurity control in the NEXT-100 double beta decay experiment: procedures and initial measurements. *J. Instrum.* 8, T01002(2013).

[3]N. Abgrall, I.J. Arnquist, F. Avignone III, et al., The MAJORANA DEMONSTRATOR radioassay program. *Nucl. Instrum. & Methods. Phys. Res. Sect. A* 828, 22-36(2016).

3 本底水平-宇生核素

对天然锗来说，因为Ge-68趋于饱和；区熔及晶体生长后，开始计算除Ge-68外的其它核素的产量。假设探测器无屏蔽制作90天、无屏蔽运输30天、地下冷却3年。

$$N(t) = \left(\frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + N_0 e^{-\lambda t} \right) e^{-\lambda T}$$

P 所关注的天然锗宇生核素在海平面处的产生率,参考[1]

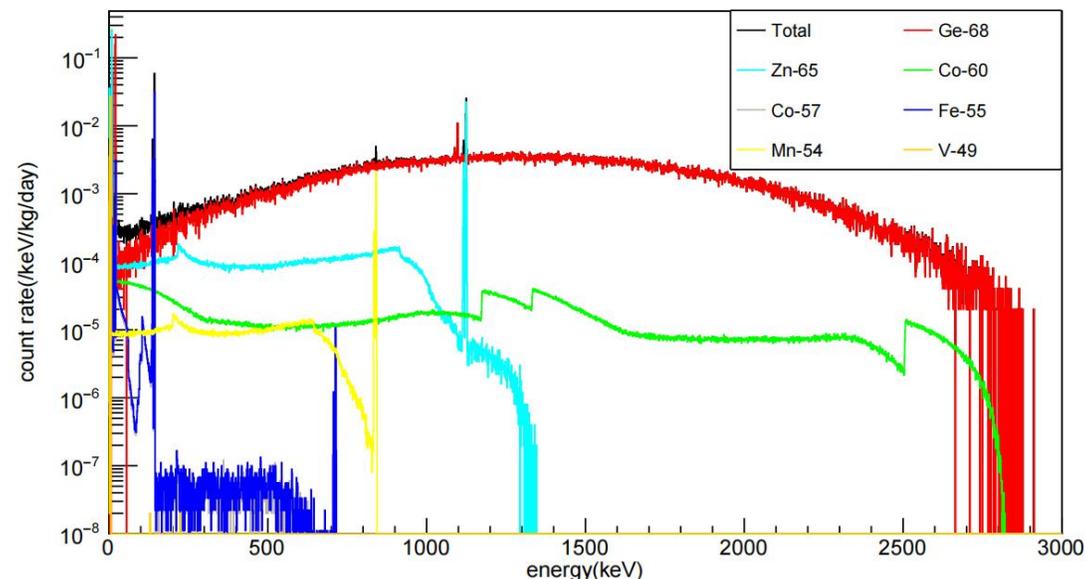
t 受照时间, 共120天

λ 对应宇生核素的衰变常数

N₀ 对应宇生核素初始核数, 除Ge-68外为零

T 地下冷却时间

按冷却3年时间点, 保守估计宇生核素本底

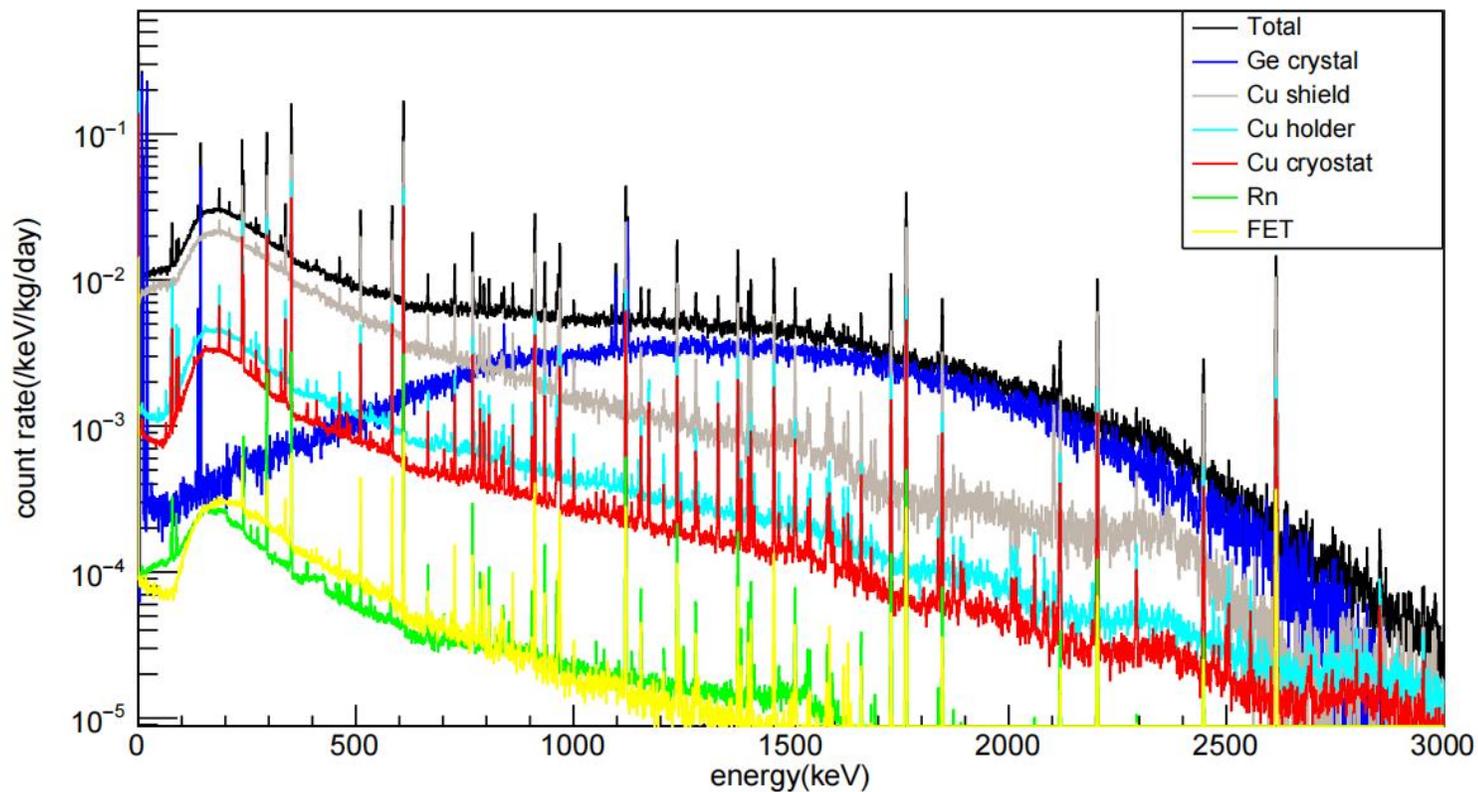


地下实验室冷却3年Ge宇生核素本底模拟能谱

核素	⁶⁸ Ge	⁶⁵ Zn	⁶⁰ Co	⁵⁷ Co	⁵⁵ Fe	⁵⁴ Mn	⁴⁹ V
刚到达实验室活度(μBq/kg)	961.23	135.35	0.71	14.28	3.89	2.55	3.66
冷却3年活度(μBq/kg)	58.34	6.03	0.47	0.88	1.79	0.22	0.37

[1] J.L. Ma, Q. Yue, S. Lin, et al., Study on cosmogenic activation in germanium detectors for future tonne-scale CDEX experiment. Sci. China: Phys. Mech. Astron. 62, 1-10(2019).

3 马林杯样品本底能谱



60-2700keV本底计数率

本底来源	counts rate kg ⁻¹ day ⁻¹
total	16.65
Ge宇生核素	4.79
Cu shield	7.77
holder	2.22
Cu Cryostat	1.64
Rn-222	0.12
FET	0.12

宇生本底不可忽略

主要本底来自铜材料的铜屏蔽、低温恒温器、支架

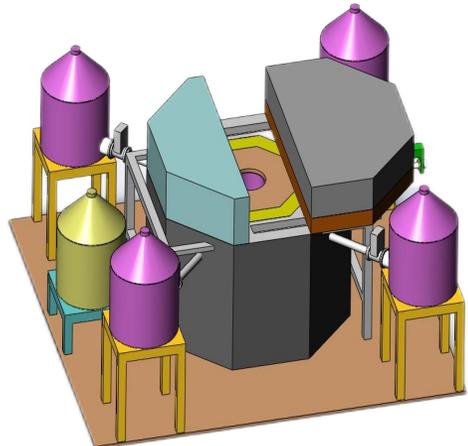
FET和氡本底不可忽略

3 不同Rn-222浓度的MDA

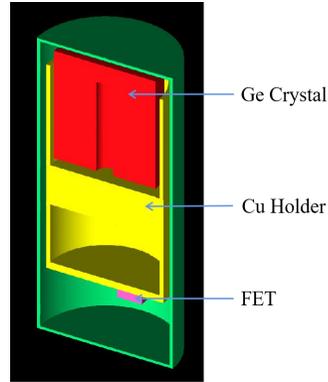
Sample shape	Mass(kg)	²²² Rn concentrations (Bq/m ³)	MDA (μBq/kg)		
			²¹⁴ Bi(609keV)	²¹² Pb(238keV)	⁴⁰ K (1460keV)
Marinelli beaker	118.29	0.1	32.8	28.8	70.9
		1	37.7	29.9	71.7
		10	65.9	38.0	78.1
Cylinder	67.66	0.1	94.1	74.8	172.6
		1	101.5	76.1	173.8
		10	154.0	87.7	185.4

对于具有118.3 kg质量的铜样品和100天测量时间，²¹⁴Bi的MDA为32.8μBq/kg，²¹²Pb的MDA为28.8μBq/kg。通过使用10μBq/kg活度的高纯无氧铜，本底计数率可以降低到小于10cpkd，马里内利烧杯形状样品的MDA可以降低到约10μBq/kg。

3 Argus模拟总结



装置外观示意图

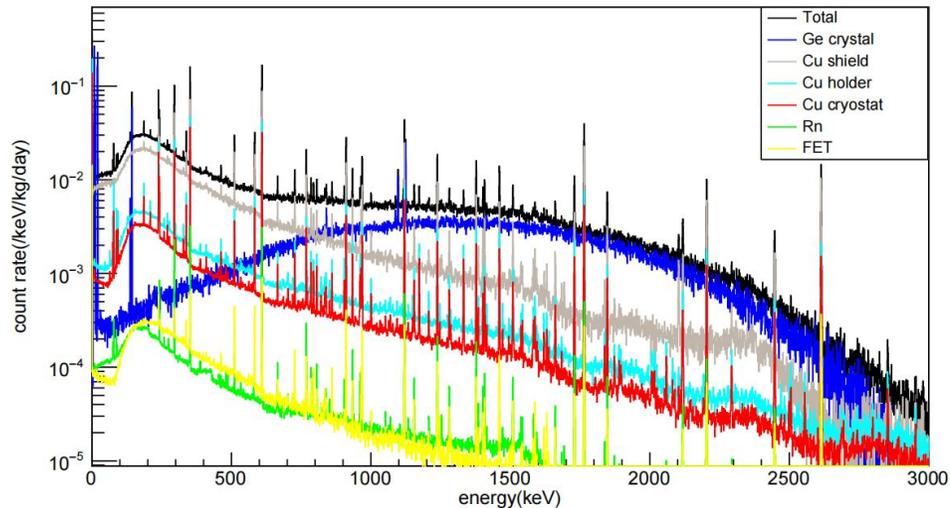


探测器几何

探测效率：改变样品形状、大小、材料和几何结构

本底水平：考虑锕铀生核素、探测器内元件、铅铜屏蔽、氡本底等

分项包括宇生核素、FET尺寸屏蔽、冷指缝、岩石本底、Ge死层、冷指下杂物等



模拟本底能谱

样品	100天 MDA($\mu\text{Bq/kg}$)	^{238}U (609keV)	^{232}Th (238keV)	^{40}K (1460keV)
马林杯 118.29kg Cu	5个探测器 冷却3年 氦浓度 0.1Bq/m^3	32.8	28.8	70.9

达到系统指标：MDA小于 $100.0\ \mu\text{Bq/kg}$

- (1) 使用GeTHU-IV能谱分解的方法检验本底模型，为极低本底谱仪模拟做参考，在此基础上完成mBq/kg量级谱仪等的模拟优化
- (2) 提出多探头谱仪ARGUS的MDA计算流程，模拟优化，达到MDA小于 $100\mu\text{Bq/kg}$ 水平，证实ARGUS可行性，为生产加工提出具体要求
- (3) 后续建成ARGUS目标，本底和MDA达到世界先进水平，优于同类探测器

下一步工作

- (1) 设计重新搭建GeTHU-IV，最终目标实现氡由 20Bq/m^3 降低至 0.1Bq/m^3 的水平
- (2) 建成ARGUS，设计完成测试实验

谢谢!

请批评指正!