

CDEX本底模型

曾志，胡庆东
清华大学

2018年6月26日



研究内容



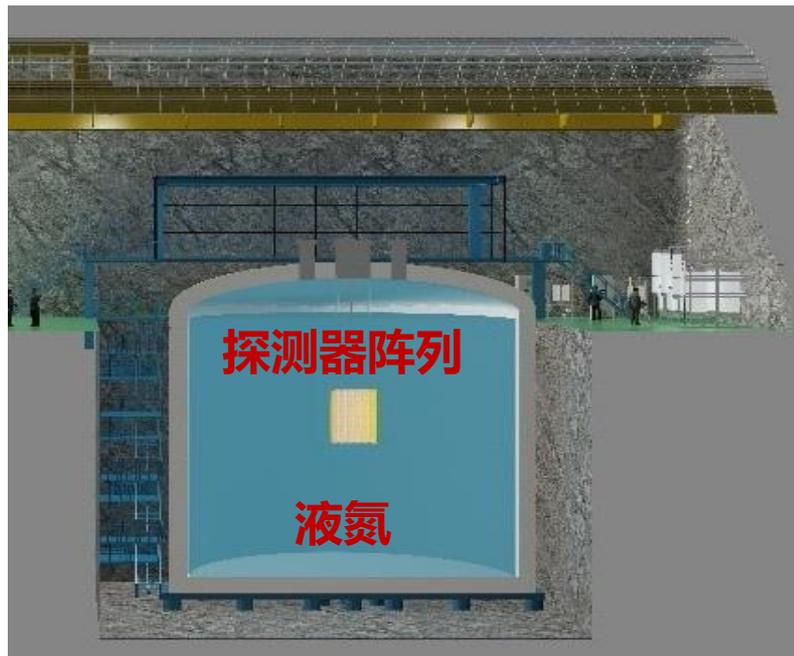
- 研究吨量级探测器屏蔽系统，**降低环境本底**，同时研究屏蔽体**材料本底**，并进行优化控制；
- 研究探测器核心构件铜的原生和**宇生放射性**，评估其本底并进行优化控制；
- 分析和测量各种本底来源，**建立CDEX-1T本底模型**，给出不同本底贡献，并对未来实验进行指导，以达到预期本底水平；



吨量级探测器屏蔽系统



吨量级探测器概念图



液氮屏蔽的优势:

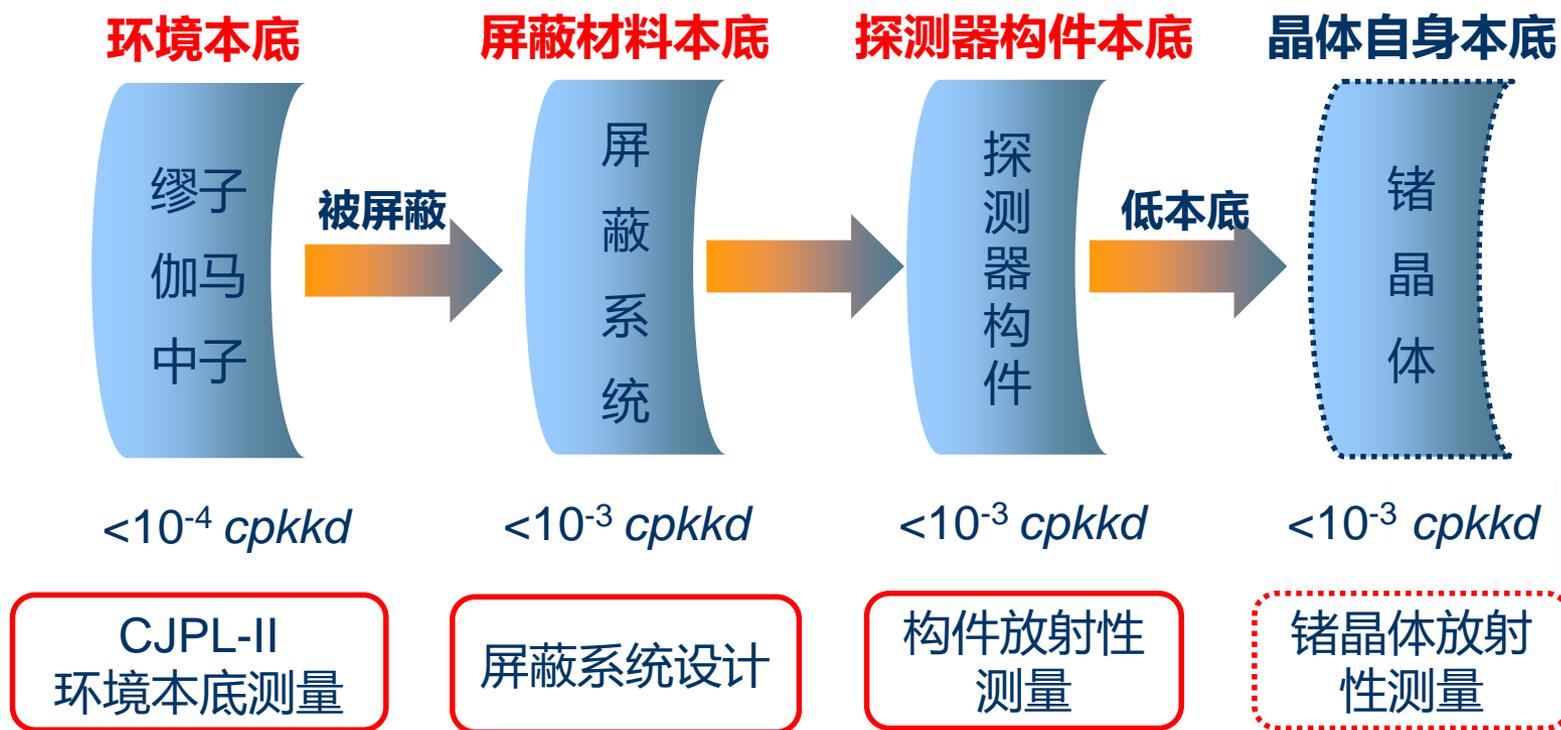
- 液氮放射性相对铜 (U/Th)、液氩 (^{39}Ar 、 ^{42}K 、 ^{222}Rn) 更干净;
- 液氮造价更低, 结构简单;
- 液氮纯化比电解铜更有效率;
- 液氮作为探测器制冷介质;
- 液氮可做切伦科夫探测器;

针对液氮屏蔽系统, 需要解决的问题:

1. 给出液氮厚度, 屏蔽外部环境本底 ($<10^{-4} \text{ cpkcd}@1\text{keV}$)
2. 研究液氮自身放射性及其产生的本底;



本底来源及控制



✓ 为了达到目标本底 $\sim 10^{-3}$ cpkkd @1keV, 需要分析探测器各种本底来源、进行优化控制;



CJPL-II 环境放射性测量



(1) CJPL-II宇宙线及其次级粒子

运行时间：2016年10月23日-2017年12月23日；

探测器：塑料闪烁体探测器；

分析方法：通过三重符合甄别缪子；



宇宙线通量率(300day)

位置与核素	通量率 ($10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
CJPL-I μ	2.0 ± 0.4 [1]
CJPL-II μ	2.2 ± 0.5
CJPL-II μ	3.17 (模拟值)
CJPL-II $\mu \rightarrow n$	0.84 (模拟值)
CJPL-II $\mu \rightarrow \gamma$	157 (模拟值)

✓ CJPL-II的缪子及其次级粒子**通量率极低**，本底相对其他本底影响小，**本研究暂不考虑**；

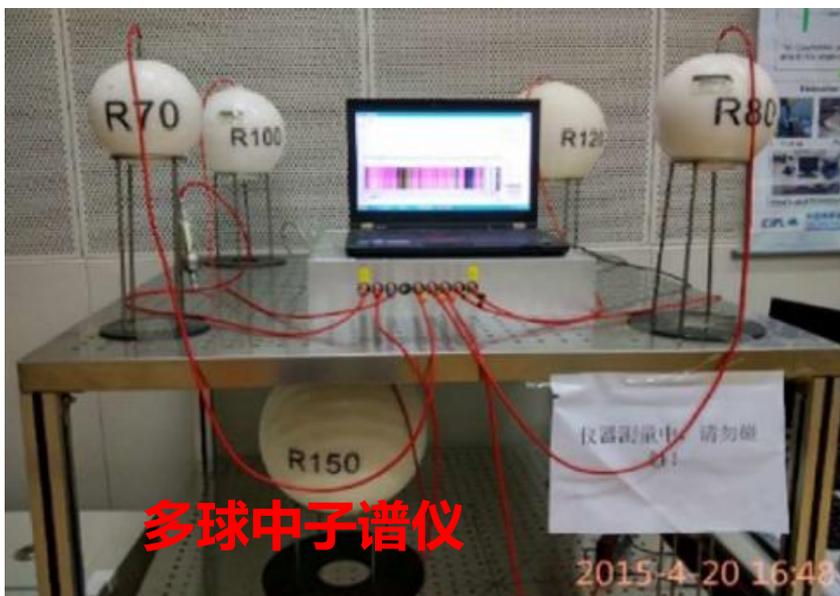


CJPL-II 环境放射性测量



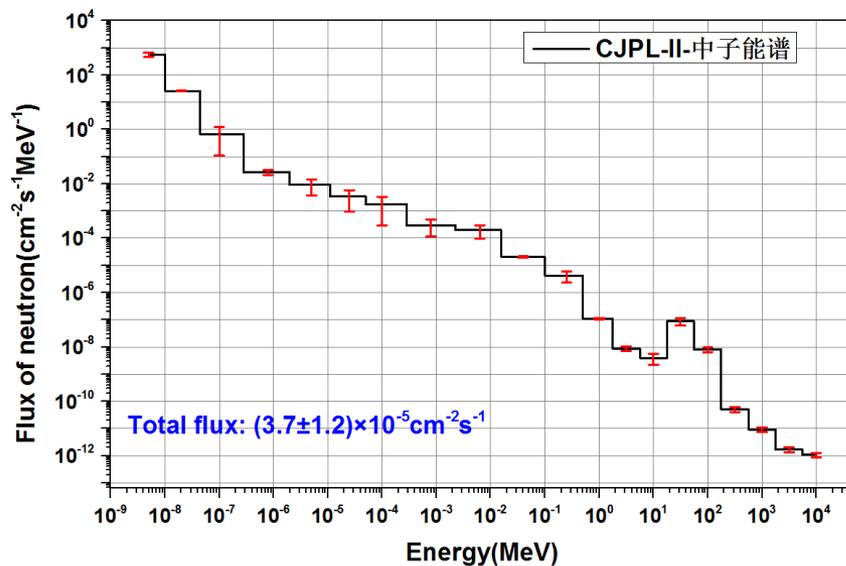
(2) 多球谱仪研制及中子能谱测量

- ✓ 研制一套多球中子谱仪，能量响应0.025eV~10GeV中子；
- ✓ 首次给出了CJPL-II 实验大厅中子能谱，主要来源于混凝土中的 (α, n) 和sf中子；



多球中子谱仪

CJPL-II中子能谱



总通量率: $(3.7 \pm 1.2) \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

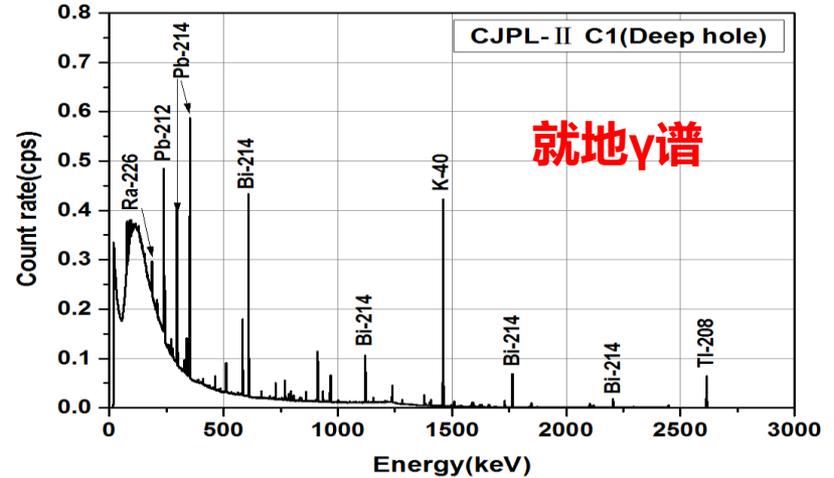


CJPL-II 环境放射性测量

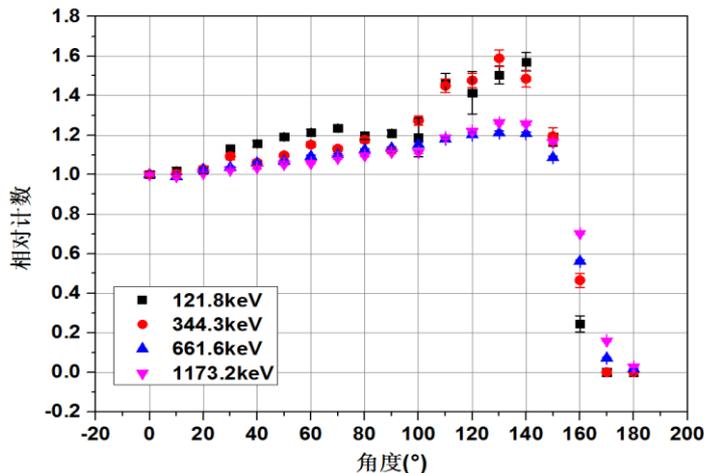


(3) 地下实验室环境 γ 测量

✓ 实验室墙壁中含有 $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ ，利用就地伽马谱仪测量其含量；



就地 γ 谱仪角响应



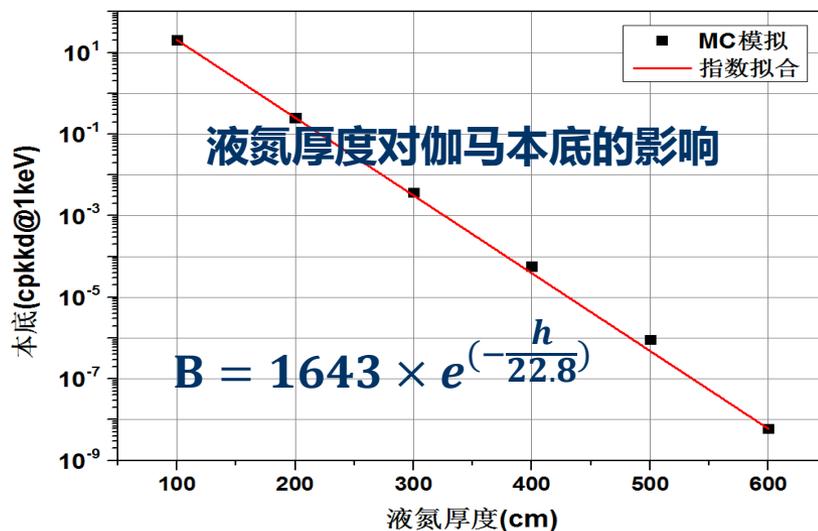
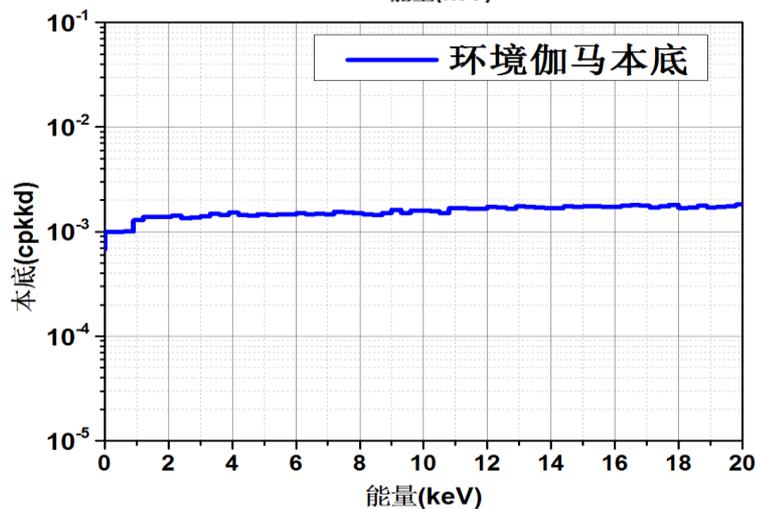
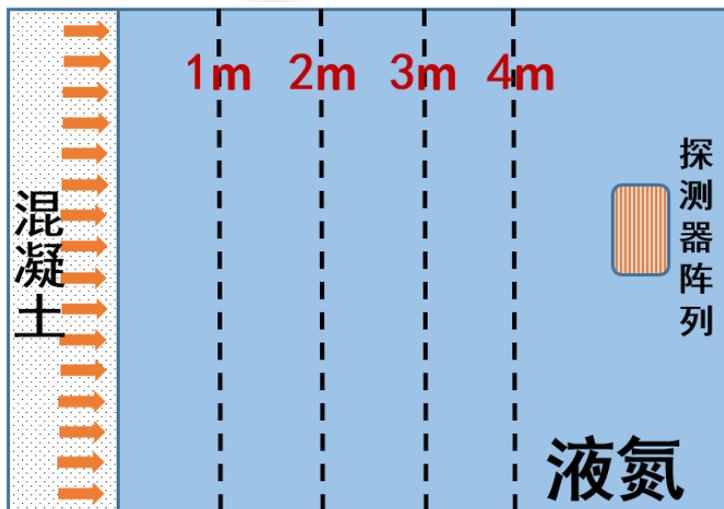
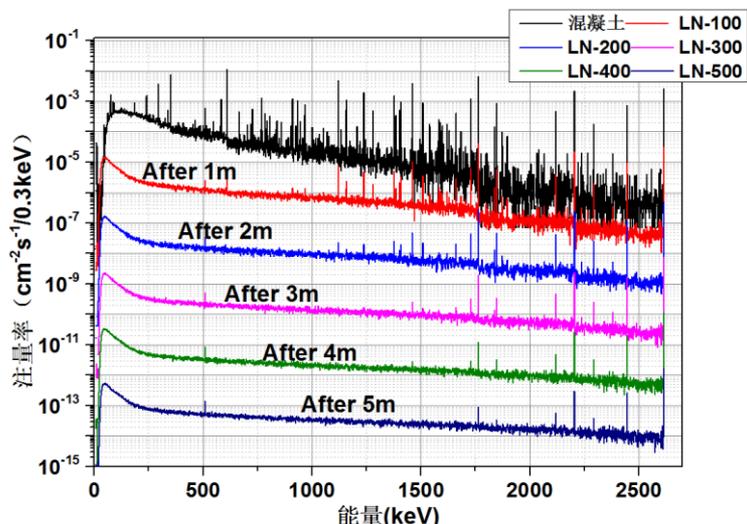
墙壁混凝土中U/Th/K含量

核素	含量 (Bq/kg)
^{238}U	8.2 ± 4.9
^{232}Th	2.9 ± 1.1
^{40}K	47.2 ± 9.1

液氮屏蔽伽马能力



液氮对伽马的衰减效果

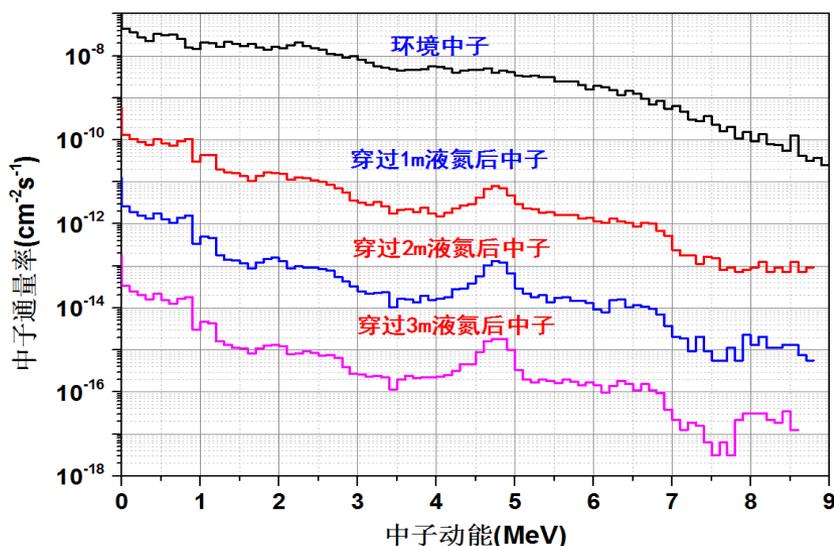


✓ 液氮厚度至少4m厚, 可将环境γ本底降低到 $<10^{-4}$ cpkkd@1keV;

液氮屏蔽中子能力



液氮对中子衰减效果



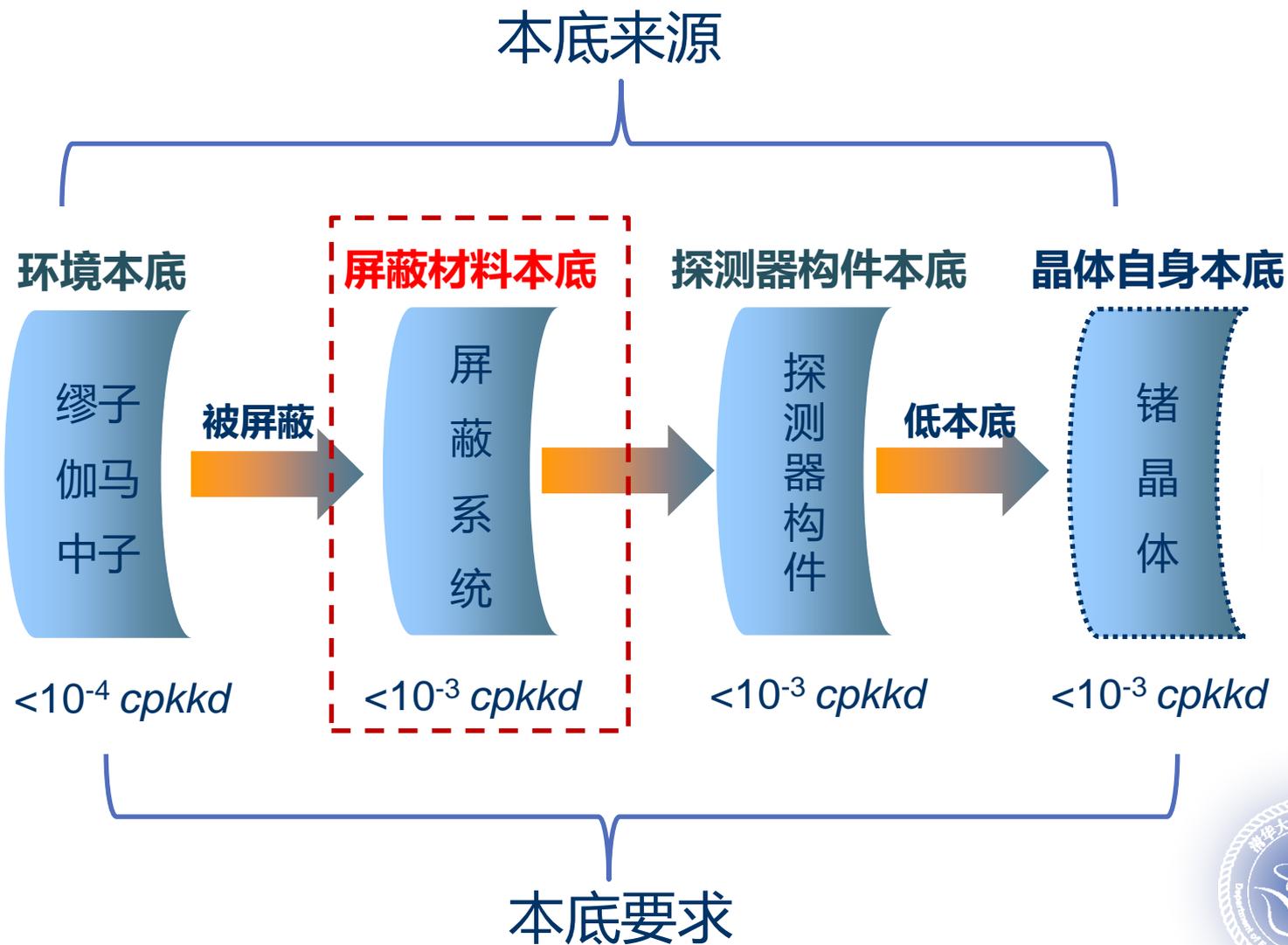
液氮厚度与中子通量率、本底

液氮厚度 (m)	中子通量率 ($cm^{-2}s^{-1}$)	在探测器内的本底 $cpkkd@1keV$
1	$\sim 10^{-9}$	$< 10^{-6}$
2	$\sim 10^{-11}$	$< 10^{-8}$
3	$\sim 10^{-13}$	$< 10^{-10}$

- 每增加1m液氮，可将中子通量降低100倍；
- 根据前人研究，单位通量中子锗本底为 $< 10^3 cpkkd@1keV/(cm^{-2}s^{-1})$ ；
- **1m液氮，环境中子本底 $< 10^{-6} cpkkd@1keV$ ；**



屏蔽系统研究



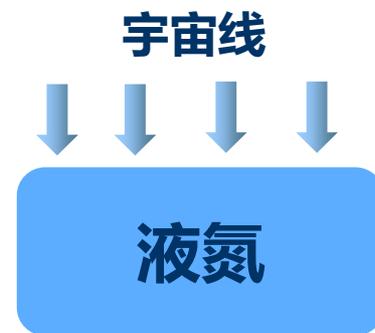
屏蔽系统自身本底



➤ 液氮中可能存在的放射性核素:

- 液氮被高能宇宙线照射后, 会产生 ^7Be 等**宇生核素**;
- 液氮在生产、运输、使用过程中会引入 ^{222}Rn 、 ^{85}Kr ;
- 液氮罐壁 (不锈钢) 会逸出 ^{222}Rn 进入液氮中;

➤ 液氮中宇生核素: Geant4+CRY



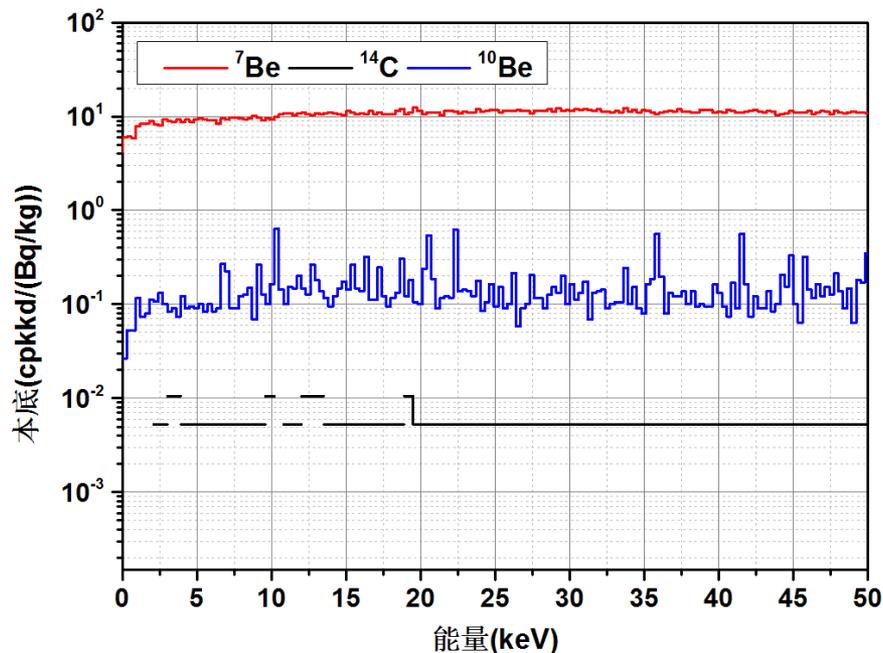
液氮被海平面宇宙线照射1年

核素	半衰期	衰变模式及能量	子体	放射性活度(Bq/kg)
^{10}Be	1.39×10^6 years	β^- 100 % (556.0 keV)	^{10}B	8.33×10^{-11}
^7Be	53.2 d	EC 10.52% (477.595 keV)	^7Li	6.77×10^{-5}
^{14}C	5730 years	β^- 100 % (156.475 keV)	^{14}N	2.57×10^{-7}

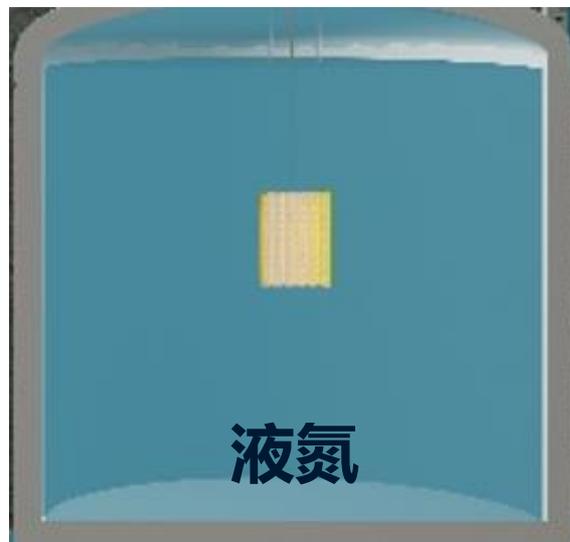
液氮中宇生本底



宇生核素在探测器内本底谱



假设 ${}^7\text{Be}$ 等在LN均匀分布



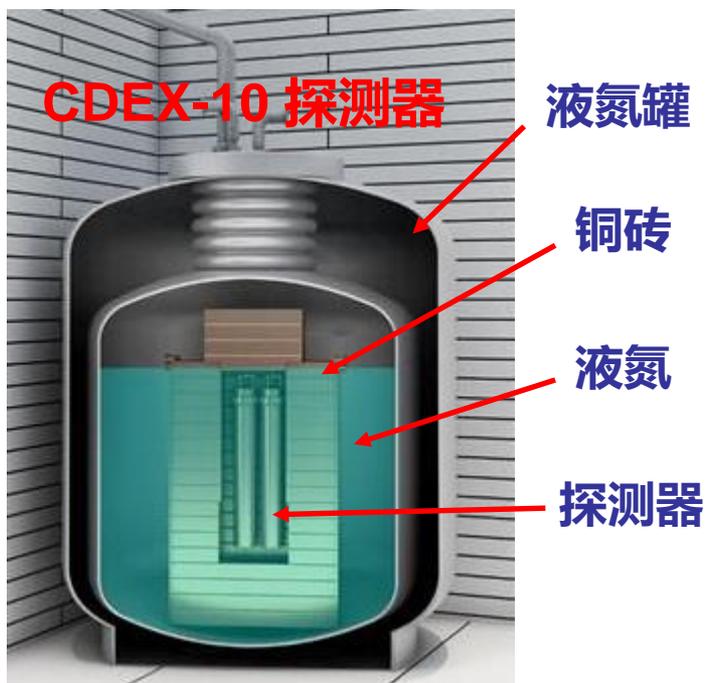
- 液氮单位活度 ${}^7\text{Be}$ 造成本底为 $10 \text{ cpkkd}/(\text{Bq}/\text{kg}) @ 1\text{keV}$, 远高于 ${}^{10}\text{Be}$ 和 ${}^{14}\text{C}$;
- 液氮中**主要考虑宇生核素为 ${}^7\text{Be}$** ;
- 锦屏山处宇宙线轰击液氮30~50 d, 可产生 ${}^7\text{Be} \sim 0.1 \text{ mBq}/\text{kg}$, 其在探测器内的本底为 $\sim 10^{-3} \text{ cpkkd} @ 1\text{keV}$;



吨量级探测器屏蔽系统



基于CDEX-10测试能谱，分析液氮中⁷Be含量



CDEX-10屏蔽结构（从外到内）

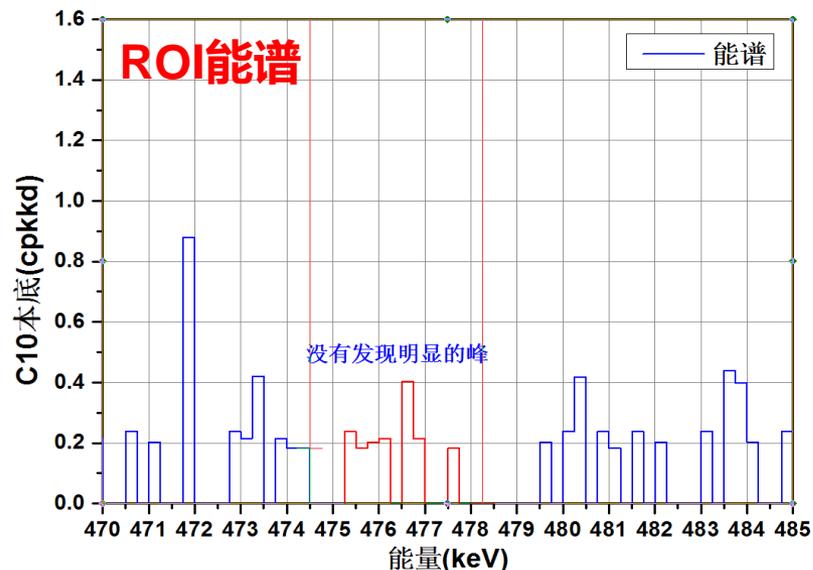
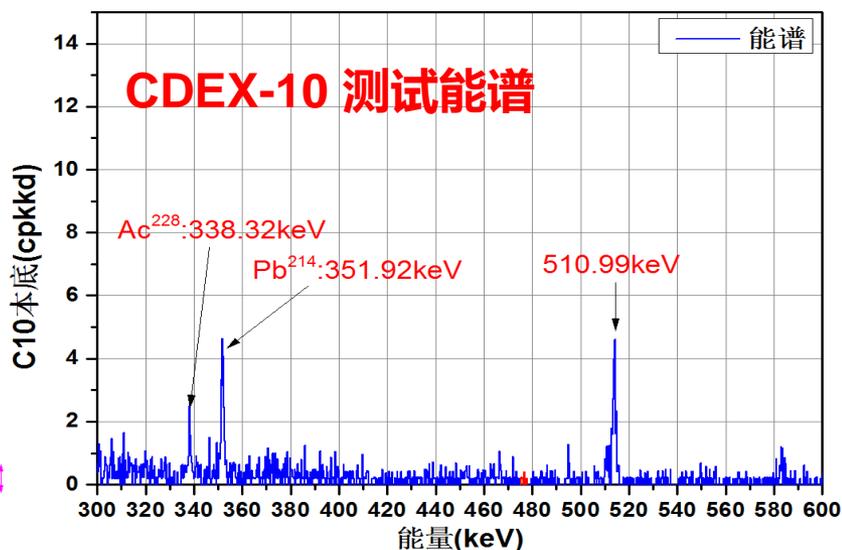
屏蔽体	材料	半径尺寸
聚乙烯	聚乙烯	100 cm
液氮（铜屏蔽外）	液氮	30 cm
铜屏蔽	铜	20 cm
液氮（铜屏蔽内）	液氮	13 cm

测量描述：

- 测量时间 2015.07-2015.10，有效数据 19 day*kg；
- 测量地点 CJPL-I；探测器：下方Ge-3探测器，1kg；



液氮中宇生本底



- 在感兴趣区 (475~478 keV) 没有发现明显的 7Be 能峰;
- 计算 7Be 计数上限:

利用 L_U 给出95%置信水平的峰区计数上限值;

- 液氮中 7Be 含量**上限为1.1 mBq/kg**, 相应本底水平上限为 10^{-2} cpkkd@1keV



液氮中宇生本底



➤ ^7Be 的半衰期只有53天，液氮在地下实验室循环使用，会自行衰减；

地下实验室 放置时间	活度 ($\mu\text{Bq/kg}$)	本底 (cpkkd@1keV)	本底上限 (cpkkd@1keV)
10 d	100	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}
30 d	75	7.5×10^{-4}	7.5×10^{-3}
50 d	58	5.8×10^{-4}	5.8×10^{-3}
100 d	30	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-3}
200 d	8	8.0×10^{-5}	8.0×10^{-4}

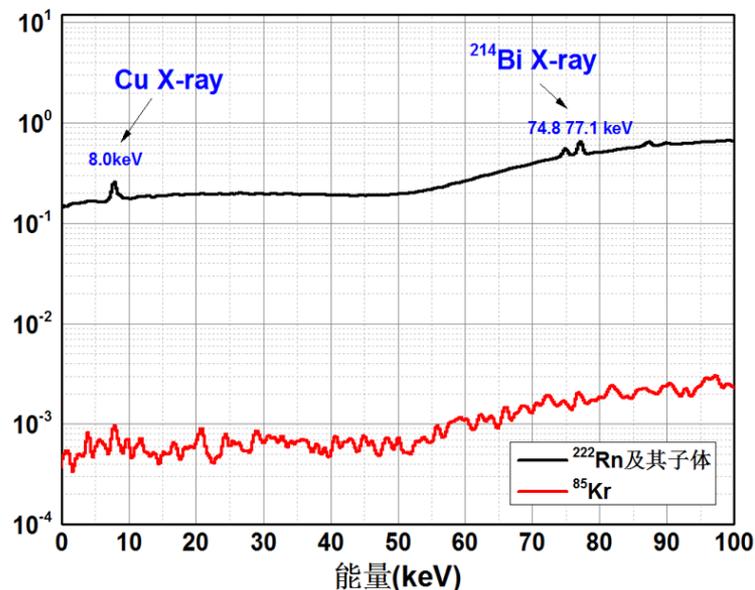
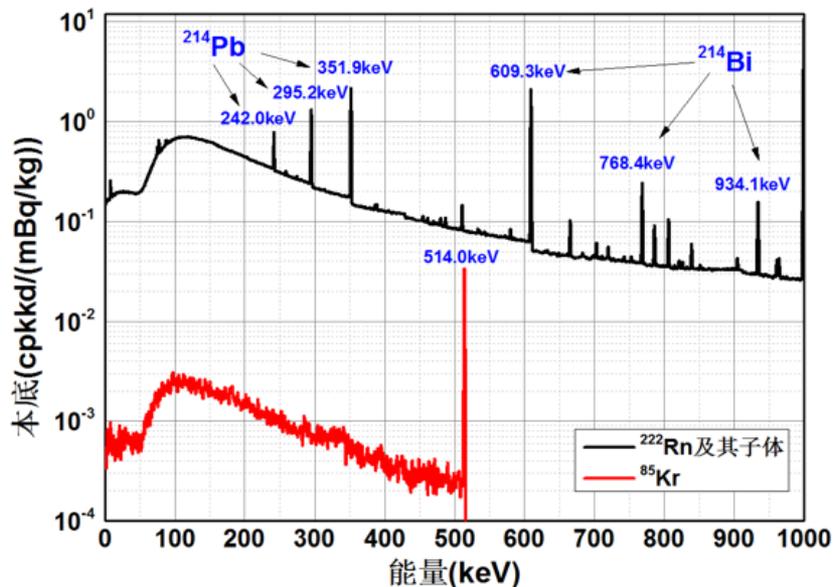
✓ 根据模拟计算，液氮中 ^7Be 为 $\sim 0.1\text{mBq/kg}$ 时，液氮在地下实验室**放置30天后**其本底可达到 $<10^{-3}\text{cpkkd@1keV}$ ；根据液氮中 ^7Be 上限值 $\sim 1\text{mBq/kg}$ ，液氮在地下实验室**放置最多不超过200天**，其本底可达到 $<10^{-3}\text{cpkkd@1keV}$ 。



液氮中 ^{222}Rn 的本底



液氮中单位活度 ^{222}Rn 及 ^{85}Kr 产生的本底



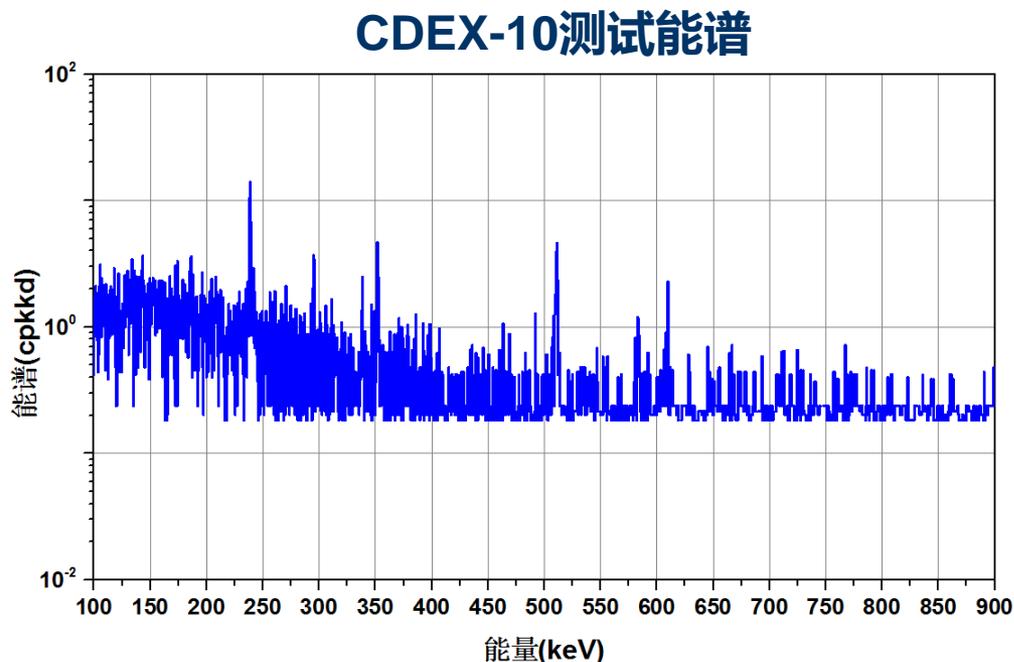
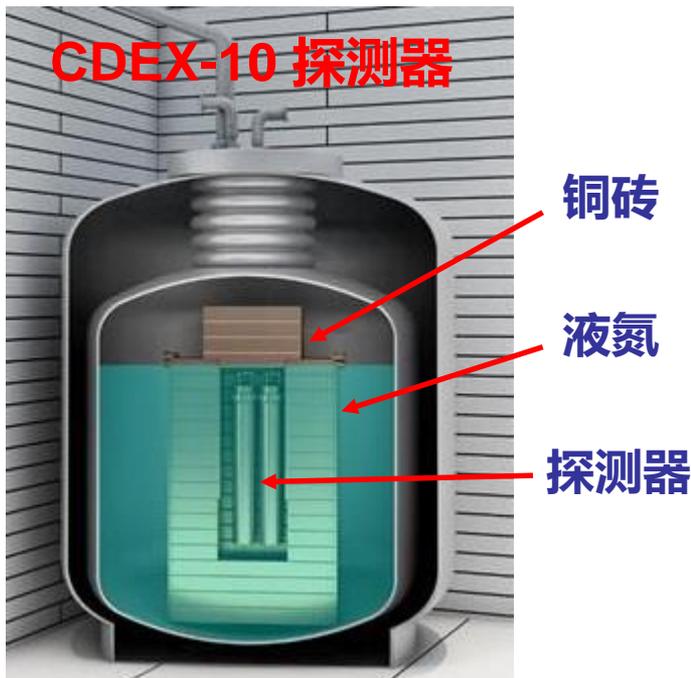
- 单位活度 ^{85}Kr 本底低、活度低, ^{85}Kr 本底 $<5 \times 10^{-6}$ cpkkd@1keV;
- 单位活度 ^{222}Rn 本底高, 0.15 cpkkd@1keV;
- **要求液氮中 ^{222}Rn 含量 $<5 \mu\text{Bq/kg}$ (本底 $<10^{-3}$ cpkkd@1keV)**



液氮中 ^{222}Rn 含量



基于CDEX-10测试能谱，分析液氮中 ^{222}Rn 含量



➤ 分析方法：利用各成分模拟谱峰，拟合实验谱峰；

$$H_i(E) = \sum a_i \cdot h_i$$

$H_i(E)$ 为实测 γ 峰面积、 h_i 为不同来源 γ 峰面积， a_i 为拟合系数；

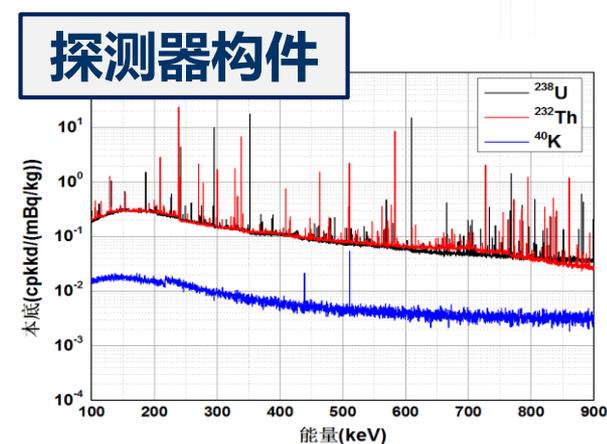
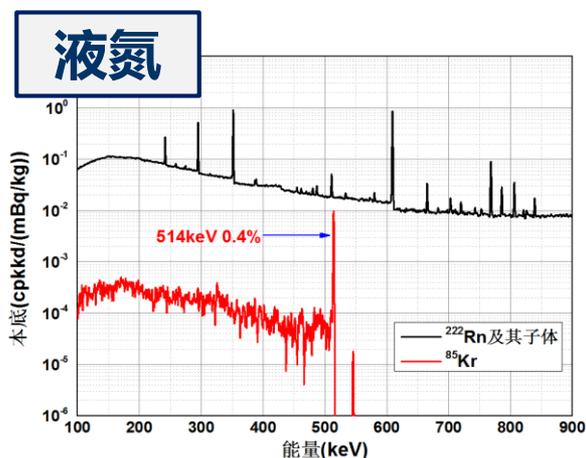
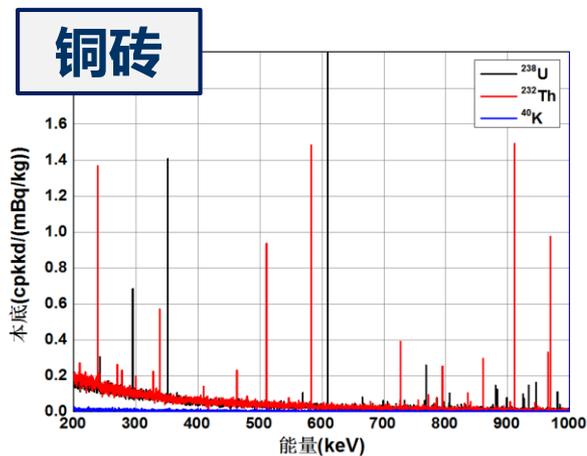
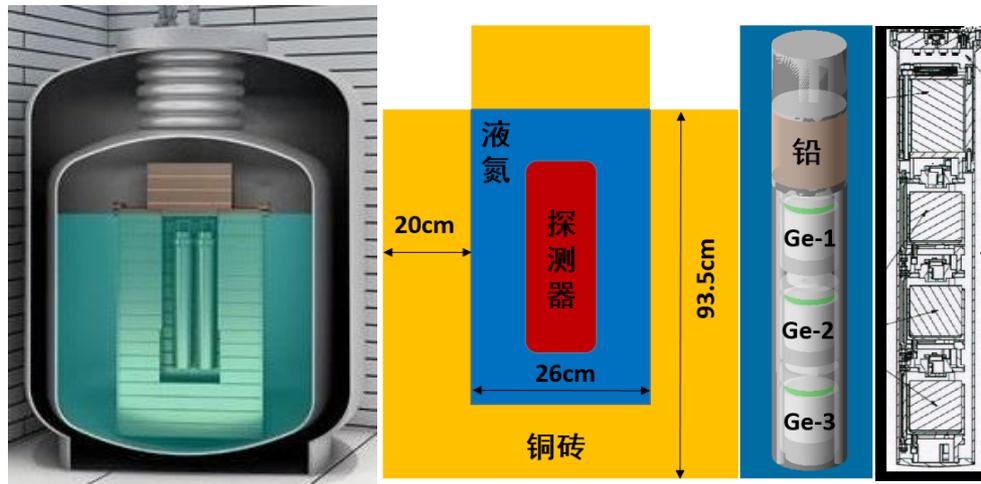


液氮中 ^{222}Rn 含量



获取各本底成分模拟谱:

- 铜砖
- 液氮
- 探测器构件
- 探测器内铅屏蔽



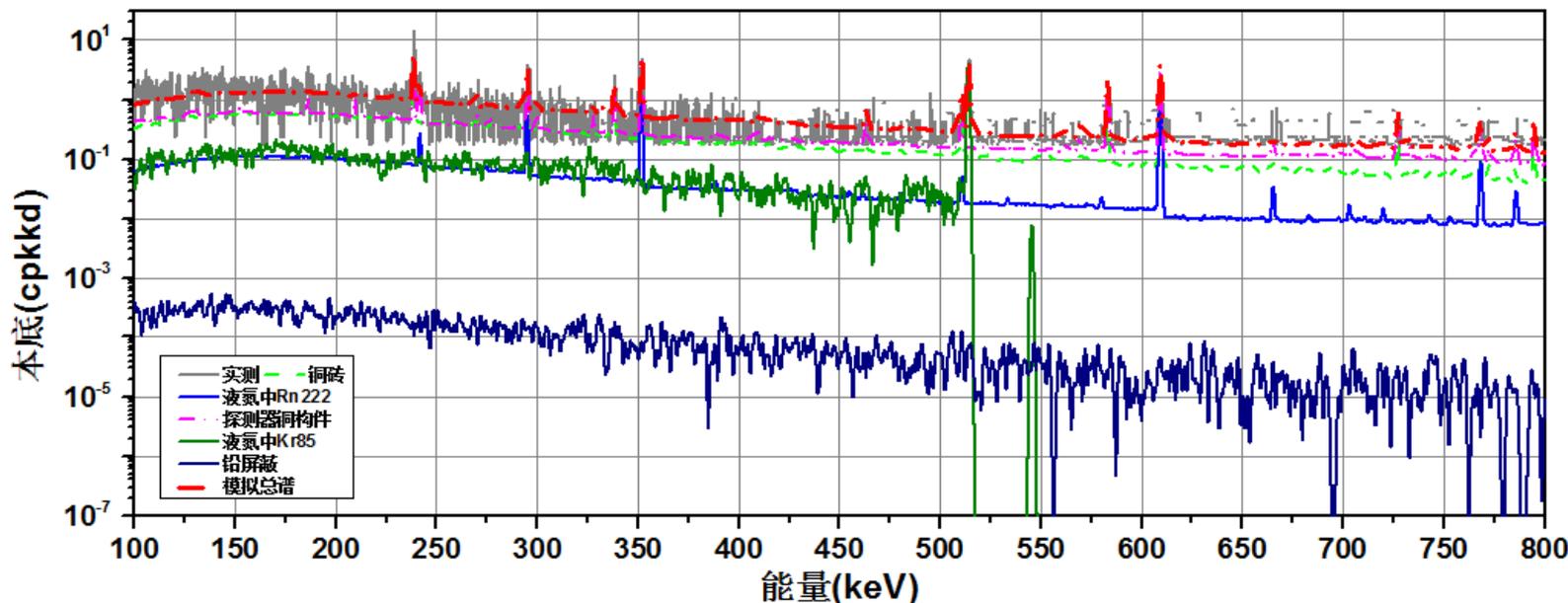
液氮中 ^{222}Rn 含量



➤ 拟合前，设定各拟合系数（核素含量）边界

伽马本底来源	主要原生核素	含量上限
铜砖	^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K	$<10\text{mBq/kg}$, $<1\text{mBq/kg}$, $<1\text{mBq/kg}$
液氮	^{222}Rn , ^{85}Kr	$<10\text{mBq/kg}$, $<10\mu\text{Bq/kg}$
探测器铜构件	^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K	$<10\text{mBq/kg}$, $<1\text{mBq/kg}$, $<1\text{mBq/kg}$
探测器内铅屏蔽体	^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K	$<1\text{mBq/kg}$, $<1\text{mBq/kg}$, $<10\text{mBq/kg}$

采用最小二乘法拟合



液氮中 ^{222}Rn 含量



拟合结果:

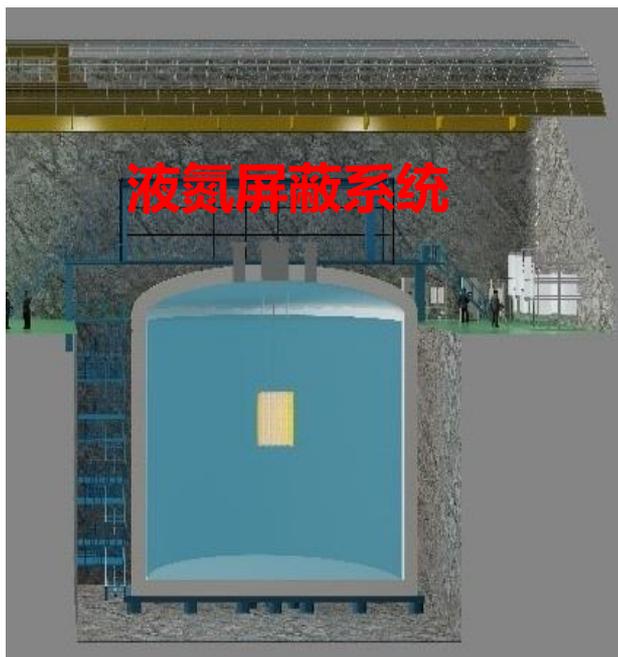
- 液氮中 ^{222}Rn 含量为~**0.1 mBq/kg**, 其在吨量级探测器中产生的本底为
 $\sim 2 \times 10^{-2} \text{ cpkkd}@1\text{keV}$;
- 液氮**需要纯化**, 需将液氮中 ^{222}Rn 含量降低到 $\sim \mu\text{Bq/kg}$, 其本底将降到
 $\sim 2 \times 10^{-4} \text{ cpkkd}@1\text{keV}$;



吨量级探测器屏蔽系统



CDEX-1T



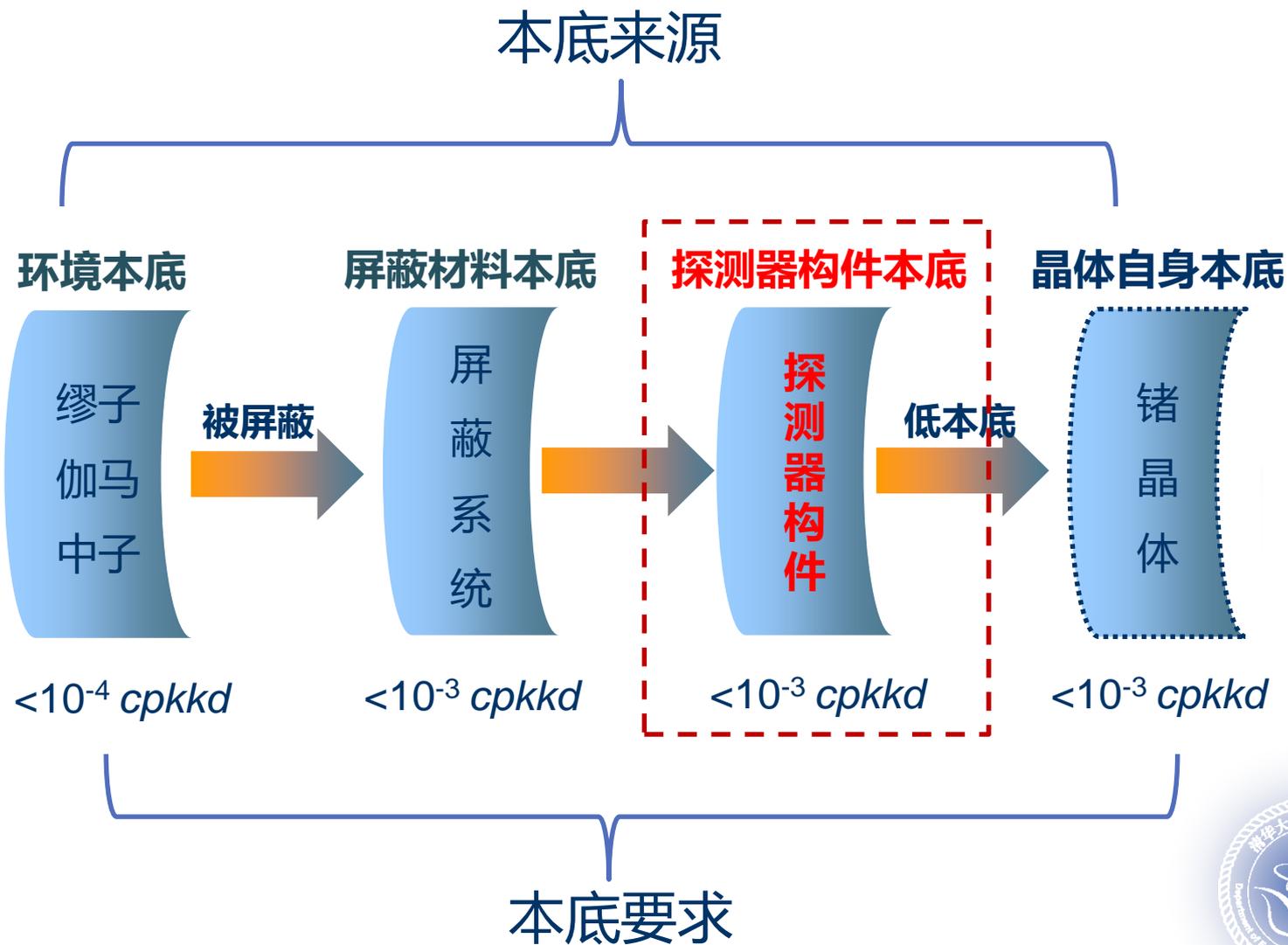
屏蔽系统本底构成

本底来源	ROI本底 (cpkcd@1keV)
液氮外部 γ	$<10^{-4}$
液氮外部中子	$<10^{-4}$
液氮中 ^7Be	$<10^{-4}$ (地下放置200d)
液氮中 ^{222}Rn	$\sim 2 \times 10^{-2}$ (未纯化)
液氮中 ^{222}Rn	$\sim 2 \times 10^{-4}$ (纯化)
液氮中 ^{85}Kr	$\sim 5 \times 10^{-6}$

✓ 采用至少4m、纯化的液氮 ($\mu\text{Bq/kg } ^{222}\text{Rn}$) 屏蔽系统, 可将吨量级探测器环境本底、屏蔽体材料自身本底降低到 $\sim 2 \times 10^{-4} \text{ cpkcd@1keV}$;



第3部分 · 探测器本底

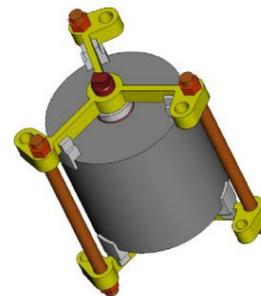
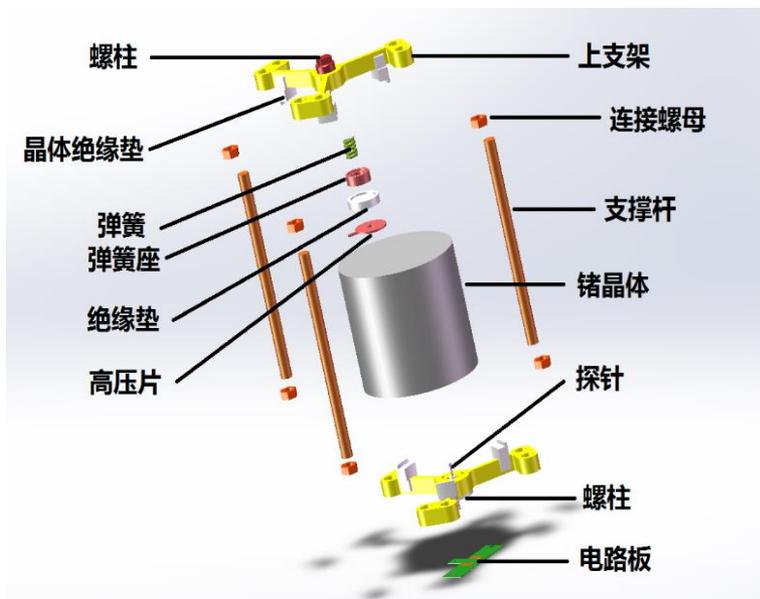


探测器构件本底研究



- 探测器核心构件分为铜材质和非铜材，铜材质居多；

CDEX-1T探测单元模型



探测器外壳为铜



- 铜材质放射性来源：

- ① 高能宇宙线轰击铜产生 ^{56}Co 等宇生核素；
- ② 铜中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 等原生核素；
- ③ 铜中 (α, n) 、sf中子；

- 非铜材质放射性来源：

- ① 高能宇宙线轰击产生的 ^7Be 宇生核素；
- ② ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 等原生核素；
- ③ (α, n) 、sf中子；



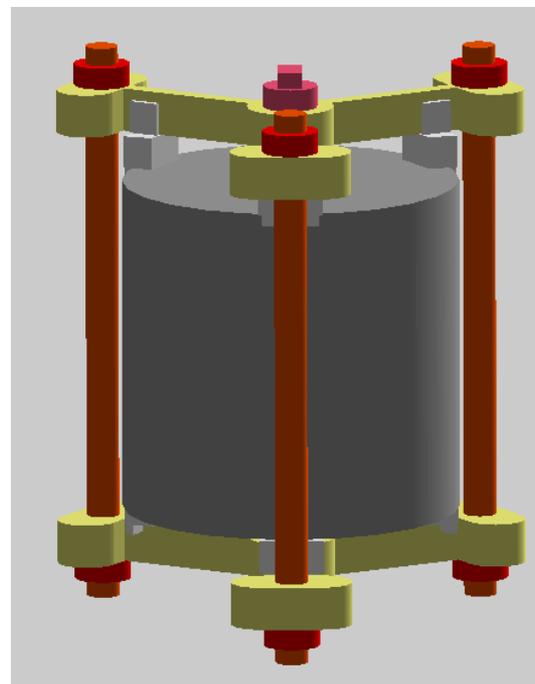
探测器构件本底研究



CDEX-1T探测器构件组成:

构件	材质	单个质量(g)	总质量(g)
晶体绝缘垫	PTFE	1.2	7.2
电路板	Teflon	5.0	5.0
螺柱(下)	PEEK	0.6	0.6
绝缘片	三氧化二铝	3.1	3.1
弹簧	硅	1.0	1.0
螺柱(上)	铜	5.1	5.1
弹簧座	铜	4.2	4.2
高压片	铜	2.0	2.0
探针	铜	1.0	1.0
连接螺母	铜	2.0	12.0
支架(下)	铜	73.8	73.8
支撑杆	铜	22.3	66.9
支架(上)	铜	73.8	73.8
铜包壳	铜	1934.9	1934.9

CDEX-1T 单个探测器

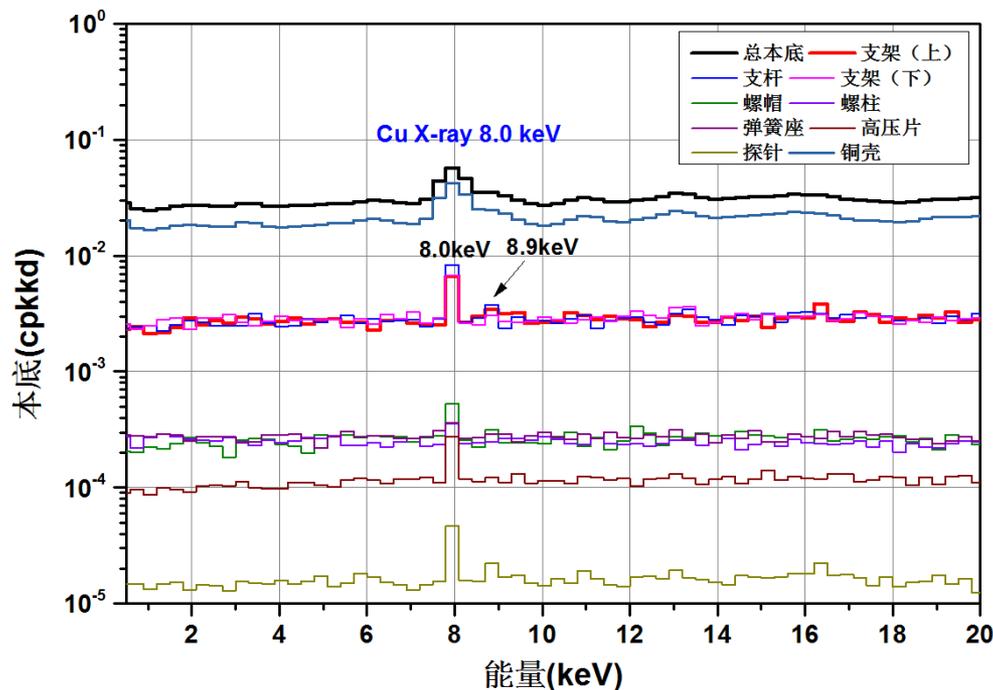


- 利用MC模拟，建立探测器的**精细模型**，分析**不同构件在探测器内产生的本底**；
- 根据不同构件本底贡献，优化自制探测器本底水平；

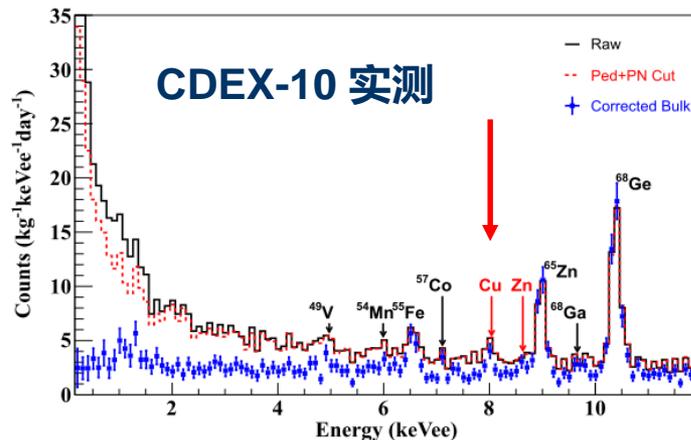


铜构件原生本底研究

铜构件原生本底能谱



- CDEX-1T探测器构件必须采用**电解铜**, 才满足本底要求 ($<10^{-3}$ cpkkd@1keV);
- 探测器**构件应尽量简洁**, 减少铜的使用量;



(1) 若采用中铝洛铜 (mBq/kg)

- 铜构件本底 $\sim 3 \times 10^{-2}$ cpkkd@1keV;
- 主要来源于铜壳 (60%, 质量大);
- 其次来源于支架、支杆 (25%);

(2) 若采用电解铜 ($1 \sim 10 \mu Bq/kg$)

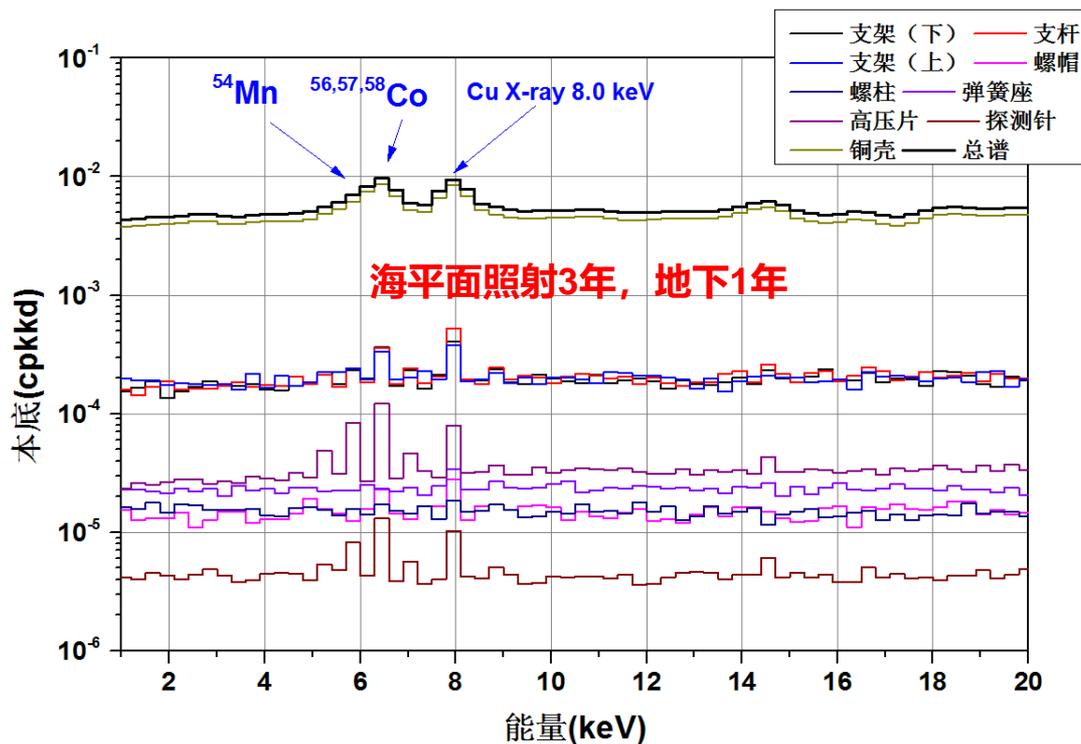
- 铜构件本底 $\sim 10^{-4}$ cpkkd@1keV;



铜构件宇生本底研究



铜构件宇生本底能谱



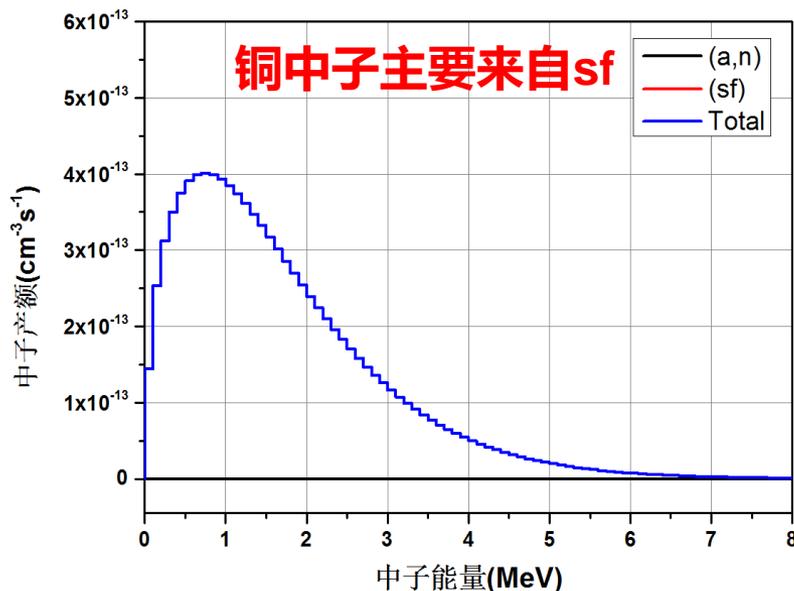
- 海平面照射3年、地下1年，宇生本底 $\sim 4.5 \times 10^{-3}$ cpk/d@1keV，主要来自铜壳 (84%) ；
- 海平面照射3年、地下1年，主要宇生核素是 ^{60}Co (38%) 、 ^{57}Co (35%) ；
- 海平面照射3年后，地下放置5年才能达到 $< 1 \times 10^{-3}$ cpk/d@1keV；



铜构件中子本底



➤ 含有²³⁸U、²³²Th的构件，会通过 (α,n) 和sf产生中子；



(α, n) 反应靶核素			自发裂变核素					
Li7	O18	Al27	Th230	Th232	U233	U234	U235	U236
Be9	F19	Si29	U238	Np237	Pu236	Pu238	Pu239	Pu240
Be10	Ne21	Si30	Pu241	Pu242	Pu244	Am241	Am242	Am243
Be11	Ne22	P31	Cm240	Cm242	Cm243	Cm244	Cm245	Cm246
C13	Na23	Cl37	Cm248	Cm250	Bk249	Cf248	Cf249	Cf250
N14	Mg25		Cf252	Cf254	Es253	Es254	Es254m	Es255
O17	Mg26		Fm254	Fm255	Fm256	Fm257		

➤ 铜构件产生的中子通量率（锆晶体附近） $<2 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；

✓ 探测器铜构件中子产生的本底 $<2 \times 10^{-8} \text{ cpkcd @ 1keV}$ ；

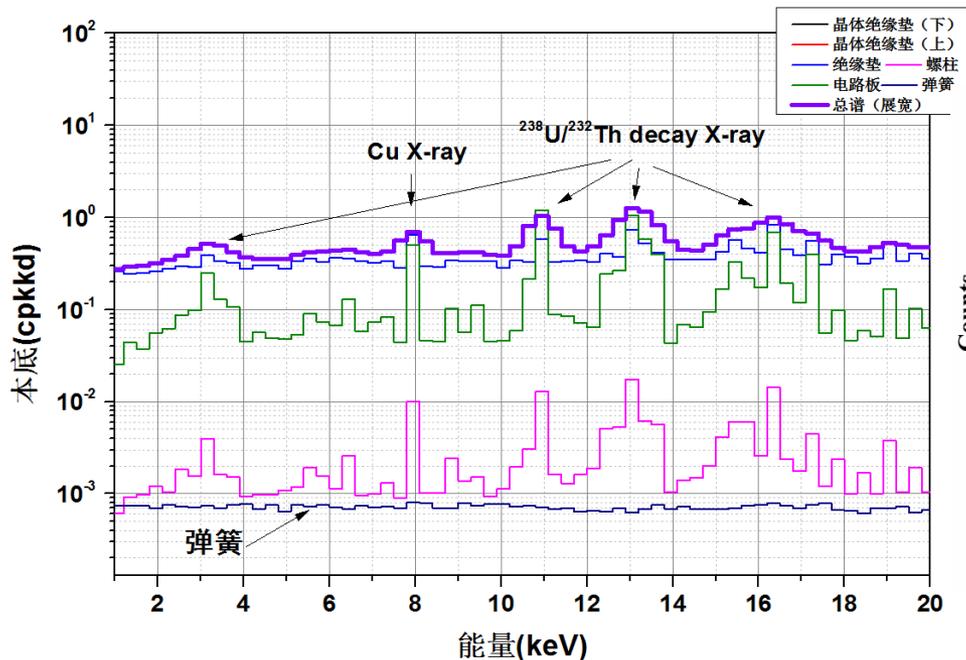
中子在锆本底为

$<10^3 \text{ cpkcd @ 1keV} (\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$

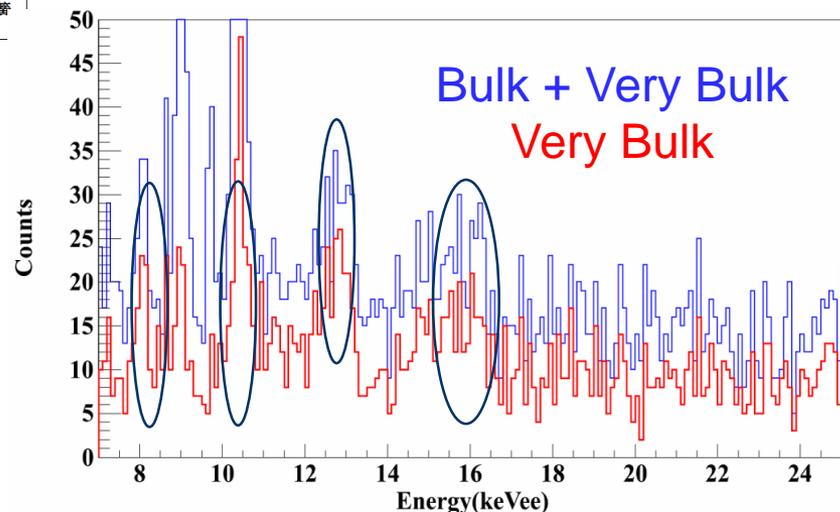
非铜构件原生本底研究



非铜构件原生本底能谱



CDEX-10 实测本底谱

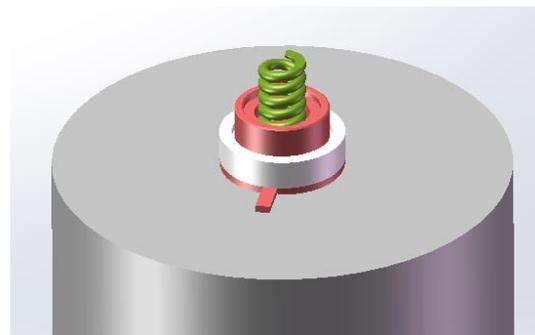


➤ 低能区出现的能峰来源分为两类:

- ① 伽马或β射线轰击铜产生的X射线 (8.0 keV和8.9 keV) ;
- ② ^{238}U 衰变链、 ^{232}Th 衰变链的X射线;

➤ 衰变链子体X射线能量相差不多, 在能谱上“挤在一起”;

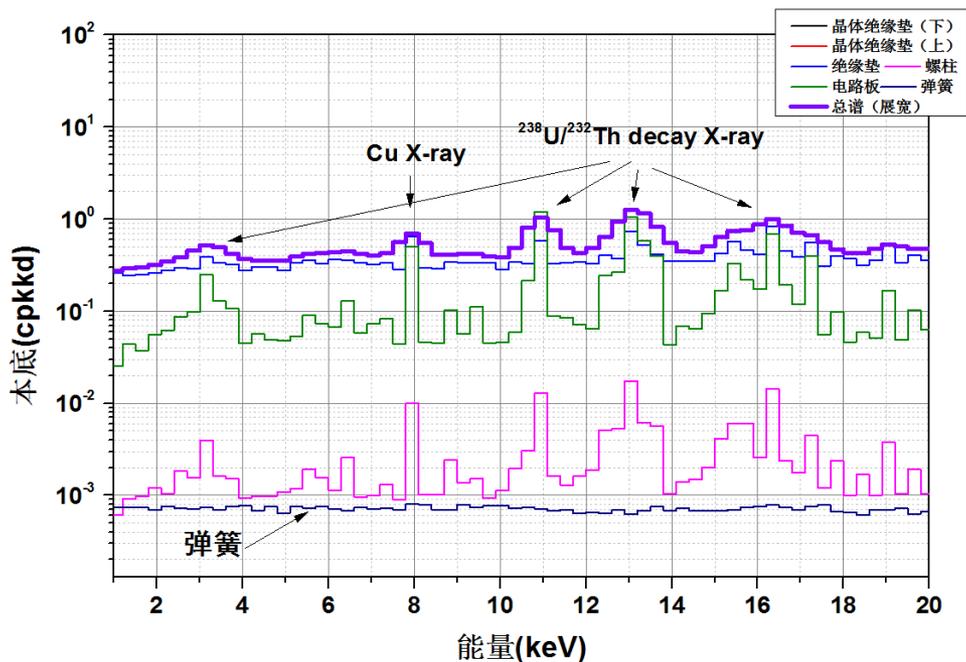
➤ 弹簧和晶体之间有一个铜材质的弹簧座, 把弹簧中出射的X射线吸收掉了;



非铜构件原生本底研究



非铜构件原生本底能谱



非铜构件活度 (mBq/kg)

构件/材质	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K
晶体绝缘座 /PTFE	<3, <0.1, <0.8 (XENON200(2011))		
绝缘片 /Al ₂ O ₃	1716, 20.3, 1920 (ILIAS UKDM)		
螺柱 /PEEK	61.8, 1.6, 5.5 (Majorana(2016))		
电路板 /Cufion	< 130 , <1.9, <48 (GERDA)		
弹簧 /Si	12.4, 4.1, 6.7 (ILIAS UKDM)		

- 非铜构件造成的本底为~0.3 cpk/d@1keV, 远高于铜构件本底;
- 非铜构件本底主要源于绝缘片 (80%) 和电路板 (10%);
- 应采用干净的非铜构件降低本底; (无法在探测器内屏蔽);
- **mBq/kg的非铜构件, 本底可降低为~2×10⁻³ cpk/d@1keV;**



非铜构件宇生本底研究



PTFE宇生放射性核素产额及活度 (海平面放置3年、地下1年)

核素	半衰期	衰变模式及能量	产额($\text{kg}^{-1}\text{d}^{-1}$)	活度($\mu\text{Bq/kg}$)
^7Be	53.2 d	EC 10.52% (477.6 keV)	29.4	2.9
^{10}Be	1.39×10^6 years	β^- 100 % (556.0 keV)	22.5	3.6×10^{-4}
^{14}C	5730 years	β^- 100 % (156.5 keV)	23.0	9.7×10^{-2}

构件	材质/质量 (g)	构件	材质/质量 (g)
绝缘垫	PTFE/7.2	电路板	Teflon/5.0
绝缘片	Al_2O_3 /3.1	弹簧	Si/1.0
螺柱上	PEEK/0.6		

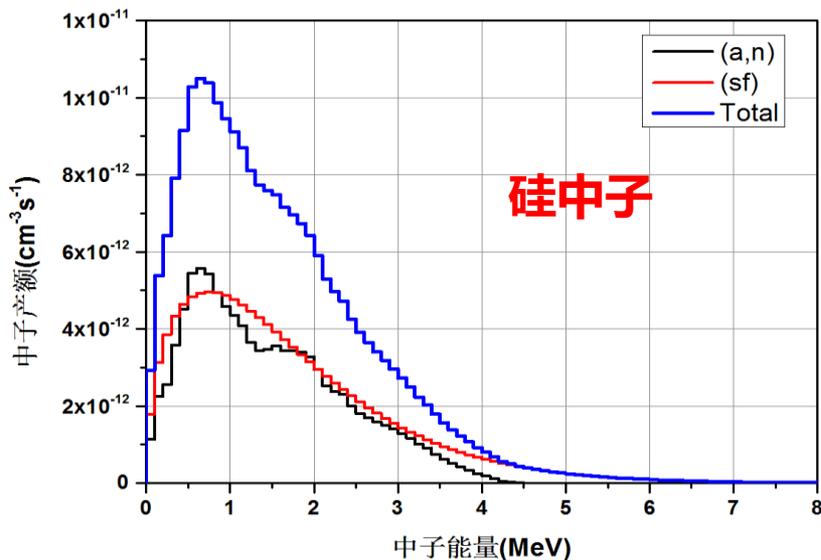
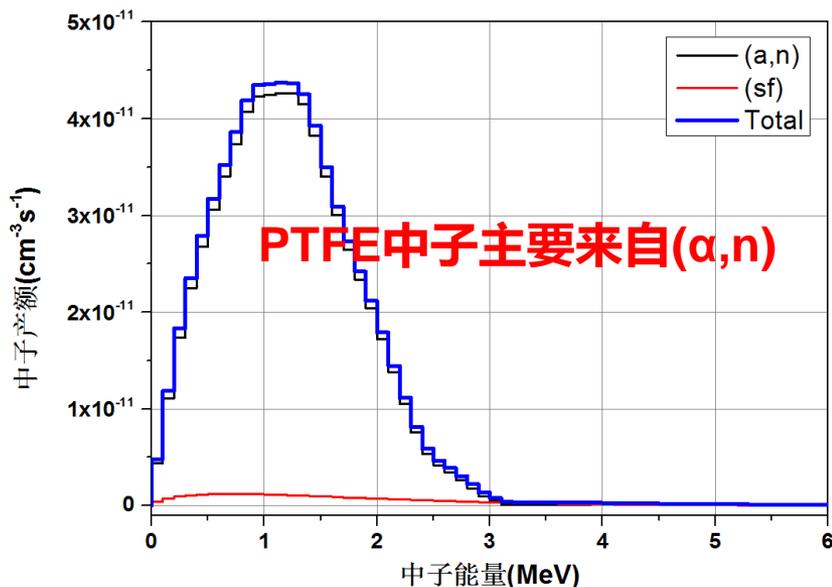
- 非铜构件主要是PTFE、PEEK等，主要元素是氢、碳和氧，宇生核素种类少；
- 非铜构件宇生核素活度低、质量小；
- **非铜构件宇生核素本底小于 10^{-6} cpkkd@1keV;**



非铜构件中子本底



➤ 含有 ^{238}U 、 ^{232}Th 的构件，会通过 (α, n) 和sf产生中子；



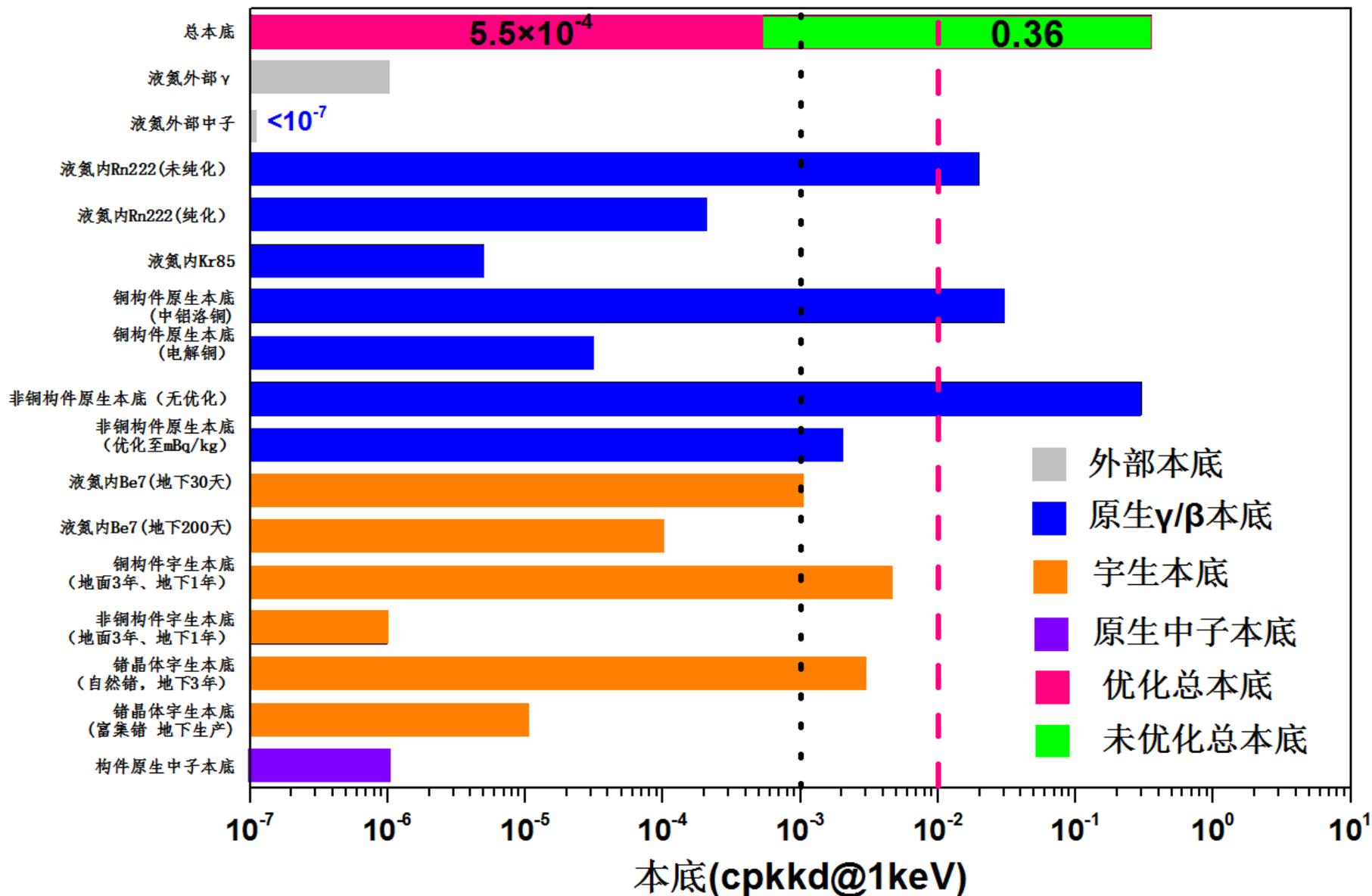
➤ 非铜构件产生的中子通量率（探测器附近） $<6 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；

➤ 探测单元的中子主要来自绝缘片和电路板（95%）

✓ 探测器非铜构件中子产生的本底 $<10^{-6} \text{ cpk/d@1keV}$ ；

中子在锆本底为
 $<10^3 \text{ cpk/d@1keV}(\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$

CDEX-1T本底模型



CDEX-1T本底优化控制



➤ 预期本底降低到 $\sim 10^{-2}$ cpkkd@1keV 【第1阶段】

- ① 至少需要4m的液氮;
- ② 液氮至少在地下放置30天;
- ③ 液氮中 ^{222}Rn 需要纯化 ($\mu\text{Bq/kg}$) ;
- ④ 探测器内铜构件需要采用电解铜 ($\mu\text{Bq/kg}$) ;
- ⑤ 铜构件如果地面放置3年, 则地下至少1年;
- ⑥ 探测器非铜构件材料放射性活度需要优化 ($\sim m\text{Bq/kg}$) ;
- ⑦ 地面生产的锗晶体地下至少放置3年;

要求具备 $\mu\text{Bq/kg}$
放射性测量能力

➤ 预期本底降低到 $\sim 10^{-3}$ cpkkd@1keV 【第2阶段】 在第1阶段的基础上:

- ① 探测器非铜构件材料放射性活度进一步优化 ($\sim 0.1 m\text{Bq/kg}$)
- ② 液氮在地下至少放置200天或者地下生产液氮;
- ③ 在地下生产锗晶体;
- ④ 在地下生产电解铜;

