

CDEX高纯锗暗物质实验中的 宇生本底模拟研究

- ✓ CDEX实验介绍
- ✓ 锗晶体内宇生放射性模拟介绍
- ✓ CDEX高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估
- ✓ 其他稀有事例探测实验的可行性

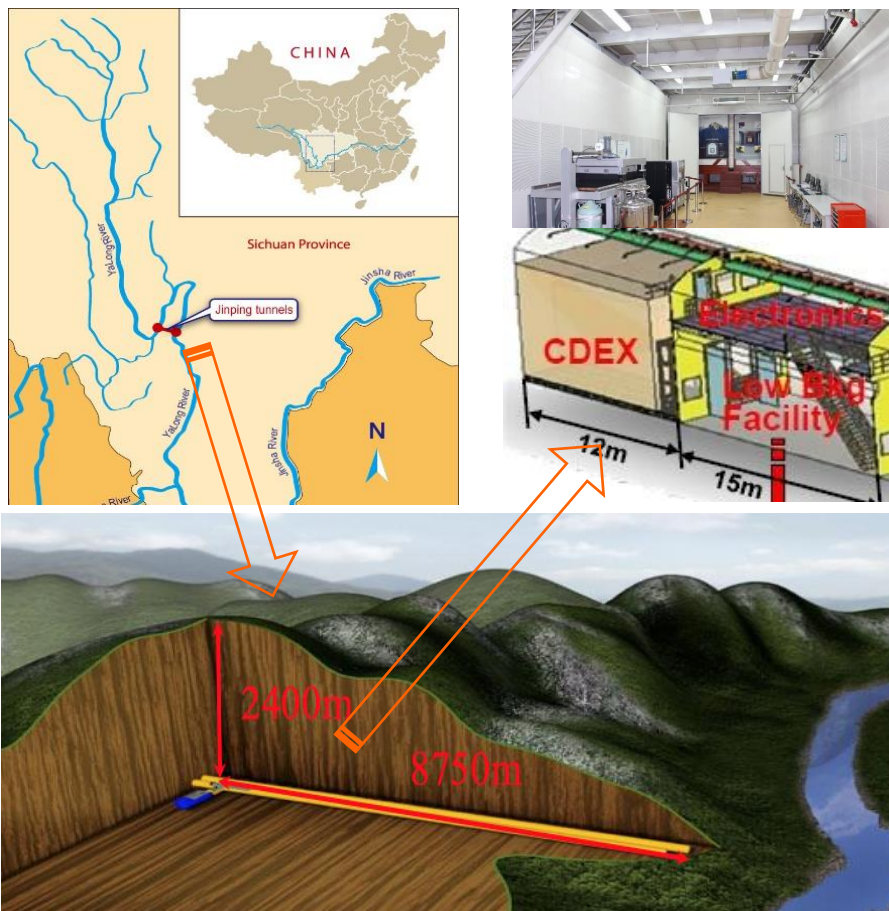


中国锦屏地下实验室
China Jinping Underground Laboratory

马菁露
清华大学

2018-06-22

➤ CDEX实验介绍： 中国锦屏地下实验室 (CJPL)



中国暗物质实验(CDEX)

目标是利用吨级高纯锗探测器阵列
探测暗物质

CDEX-1

1 kg级高纯锗探测器
探测技术、本底理解、数据处理流程

CDEX-10

10 kg级高纯锗探测器
探测器阵列、液氮直冷技术

CDEX-1T

轻质量暗物质直接探测、双 β 衰变测量

➤ 实验本底来源分析:

周围环境中的放射性:

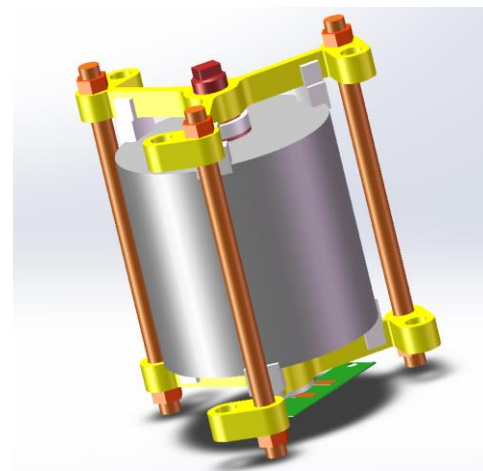
- 宇宙线 μ 子: CJPL的 μ 子通量: $(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (可忽略)
- 环境中子本底: μ 致中子 $\sim 10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (可忽略)
(α, n)中子、 ^{238}U 自发裂变中子 $\sim 10^{-5} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 环境伽马本底: 岩石、混凝土及液氮恒温器中的天然放射性 (U系、Th系、 ^{40}K)

探测器结构材料和电子学放射性:

- 探测器支撑材料、电子学器件的宇生及天然放射性
电解铜、材料筛选等优化后 $10^{-3} \text{ cpkkd @ 2\sim 4 keV}$

锗晶体内部宇生放射性:

- 长半衰期宇生放射性核素 (^{68}Ge 、 ^{65}Zn 、 ^3H 等)



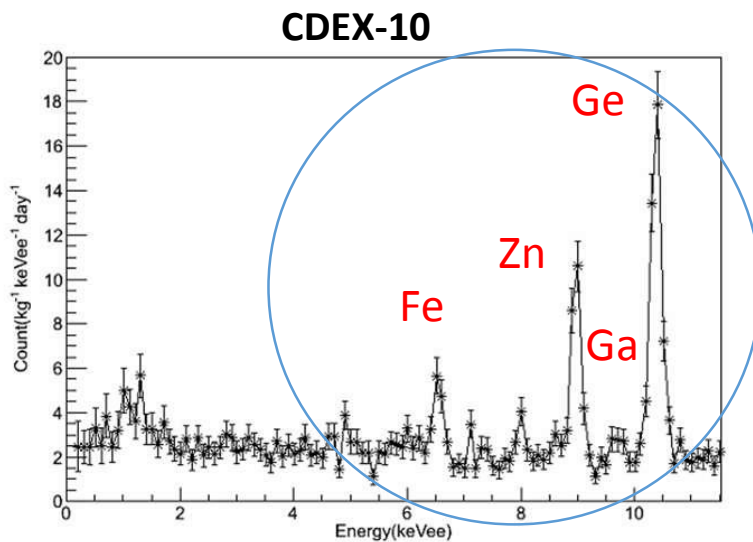
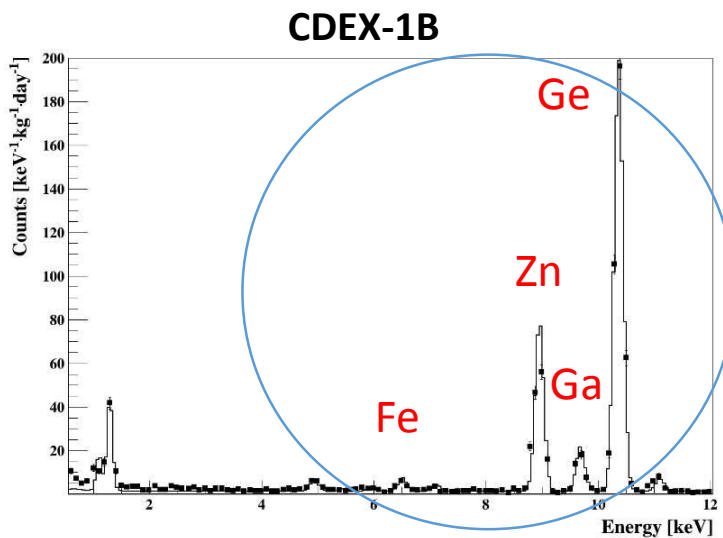
➤ 宇生放射性核素产生机制及特点：

- 当高能宇宙射线轰击锗晶体时，会与锗原子发生俘获、非弹散射、散列等反应，在晶体内部产生一系列具有放射性的不稳定核素；
- 宇生放射性核素依据各自半衰期进行衰变，伴随放出伽马、电子等粒子，构成本底来源的一种；
- 核素种类繁多（对于Ge来说可能的有： $^{78}\text{Se} \sim ^2\text{H}$ ）；
- 核素半衰期分布从数秒到几百年；
- 过程复杂，覆盖能量范围宽，随时间演化。

锗晶体内宇生放射性

➤ 宇生本底的重要性:

- 在CDEX1、CDEX10上都看到了明显的宇生核素特性射线峰
- 在晶体内部，无法屏蔽，一旦产生短时间内很难有效去除
- 其来源及抑制方法的研究对吨级实验本底抑制意义重大
- 需要先于实验展开研究



锆晶体内宇生放射性模拟

➤ 分析方法

如果认为 P_i 为放射性同位素 i 的产生率，那么它可以表示成以下公式：

$$P_i = \sum_j N_j \int \Phi_k(E) \sigma_{ijk}(E) dE$$

↓ ↓
CRY Geant4

N_j : 稳定的靶核 j 的数量

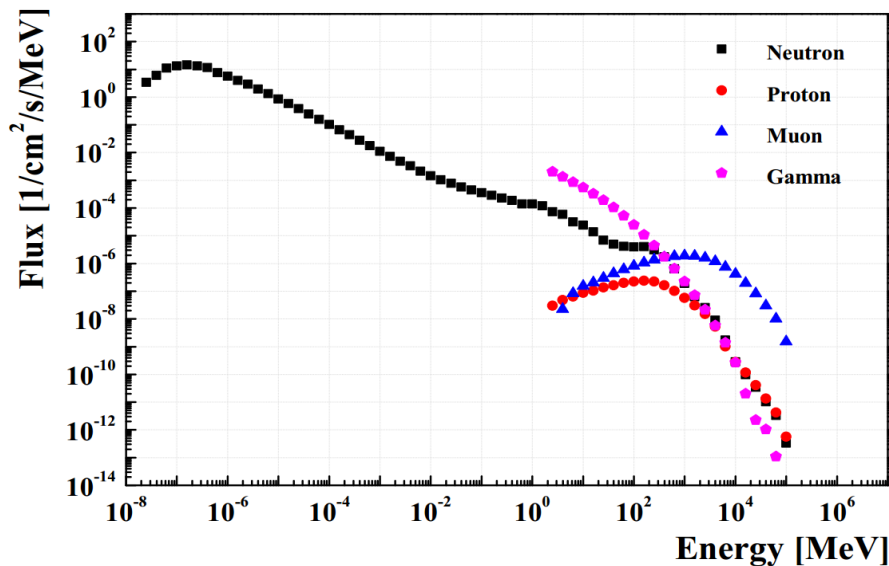
Φ_k : 宇宙射线 k 粒子的通量

σ_{ijk} : 宇宙射线 k 粒子作用在稳定靶核 j 上产生放射性同位素 i 的反应截面

模拟过程：

- CRY产生的宇宙射线信息作为源项输入；
- Geant4模拟宇宙射线与物质的相互作用；
- 统计宇宙线Neutron、Proton、Muon、Gamma入射情况下宇生放射性核素产生率。

北京海平面宇宙射线能谱



锗晶体内宇生放射性模拟

➤ 宇生放射性核素衰变规律

当锗晶体暴露在宇宙射线的照射下，满足：

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N$$

N : t 时刻时某种放射性核素的数量

P : 其单位时间内的产额

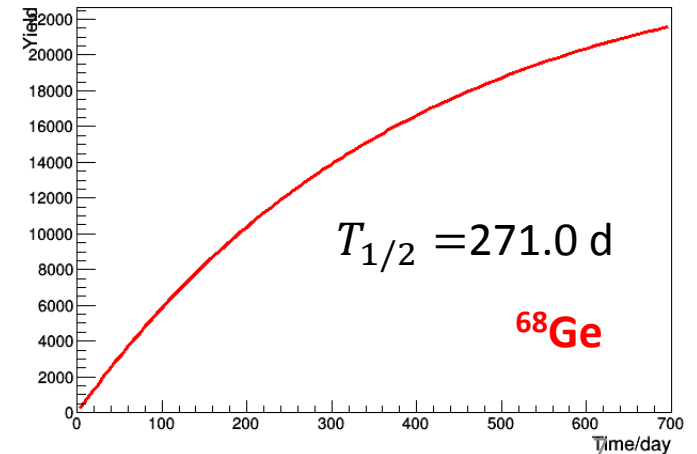
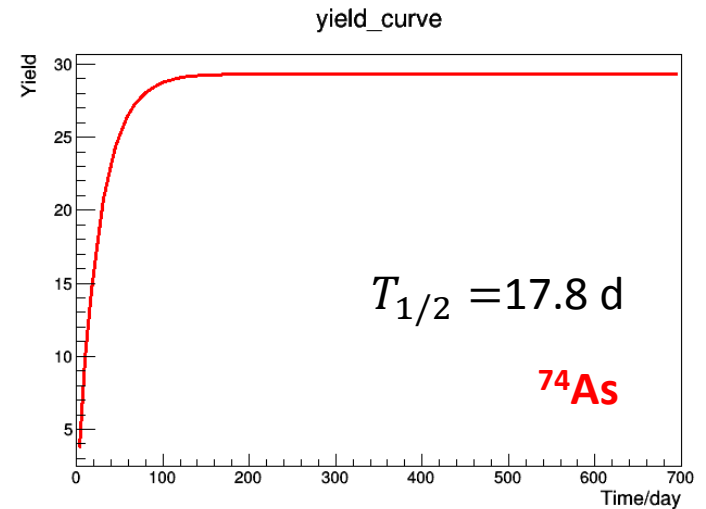
λ : 其衰变常数 ($\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$)

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

饱和产额:
$$N_{max} = \lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = \frac{P}{\lambda}$$

饱和时间 (95%):
$$t = \frac{\ln 20}{\lambda} \approx 4.322 \cdot T_{1/2}$$

2018/6/22



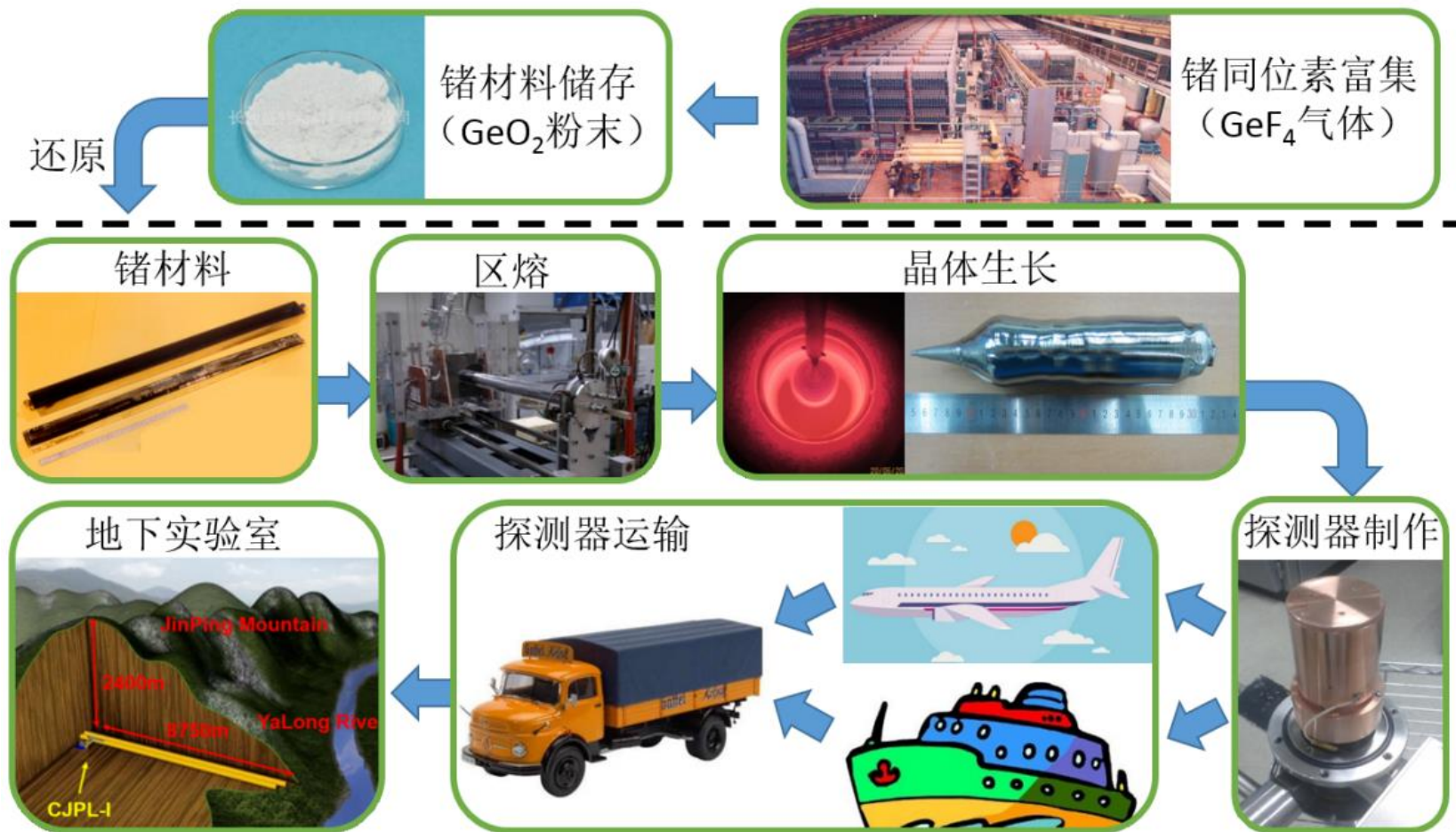
锆晶体内宇生放射性模拟

➤ 主要放射性核素评估（综合考虑半衰期与产生率）

宇生核素	半衰期	衰变模式	衰变子体	产生率（北京）(day ⁻¹ kg ⁻¹)				
				中子	质子	μ子	伽马	总和
⁶⁸ Ge	270.9 d	EC	⁶⁸ Ga	73.30	5.41	0.31	4.03	83.05
⁶⁸ Ga	67.7 m	EC or β ⁺	⁶⁸ Zn	73.30	5.41	0.31	4.03	83.05
⁶⁵ Zn	243.9 d	EC or β ⁺	⁶⁵ Cu	35.14	3.64	1.23	0.46	40.47
⁶³ Ni	101.2 yr	β ⁻	⁶³ Cu	4.05	0.54	0.12	0.08	4.79
⁵⁷ Co	271.7 d	EC	⁵⁷ Fe	3.55	1.07	0.03	0.03	4.68
⁶⁰ Co	5.3 yr	β ⁻	⁶⁰ Ni	1.21	0.22	0.01	0.01	1.45
⁵⁵ Fe	2.7 yr	EC	⁵⁵ Mn	3.01	1.05	0.04	0.05	4.15
⁵⁴ Mn	312.2 d	EC	⁵⁴ Cr	0.67	0.24	0.01	0.02	0.94
⁴⁹ V	330.0 d	EC	⁴⁹ Ti	0.90	0.49	0.02	0.02	1.42
³ H	12.3 yr	β ⁻	³ He	18.33	4.82	0.33	0.20	23.68

锗晶体内宇生放射性模拟

➤ 锗材料宇宙射线照射场景



锆晶体内宇生放射性模拟

➤ 宇生核素产额计算过程及参数确定

- 假设探测器制作过程中，产生率 P_1 ，制作时间 t_f
运输过程中，产生率 P_2 ，运输时间 t_t
经过 t_f+t_t 后的某宇生放射性个数为：

$$N = \frac{P_1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_f})e^{-\lambda t_t} + \frac{P_2}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_t})$$

放入地下实验室后，经过冷却时间 t_c 后的个数为：

$$N = \frac{P_1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_f})e^{-\lambda(t_f+t_c)} + \frac{P_2}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_t})e^{-\lambda t_c}$$

- 由于CDEX-1B探测器的历史清楚并且较为简单，可以利用CDEX-1B的本底数据对模拟结果进行验证。

数据编号	冷却时间 (day)	采数起止日期	采数时间 (day)	活时间 (day)
1	147	20140327 ~ 20140520	55	51.3
2	331	20140927 ~ 20141108	42	40.4

锗晶体内宇生放射性模拟

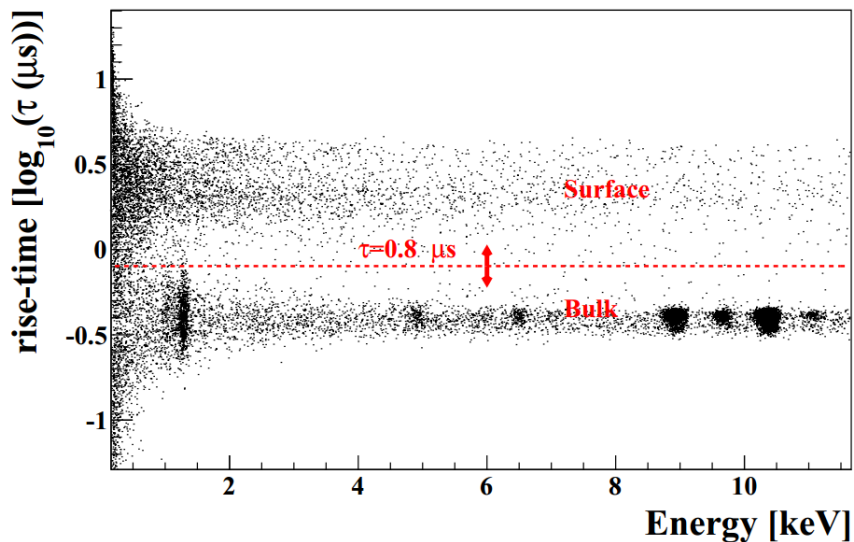
➤ 参数确定

- 用CDEX-1B的实验数据进行验证

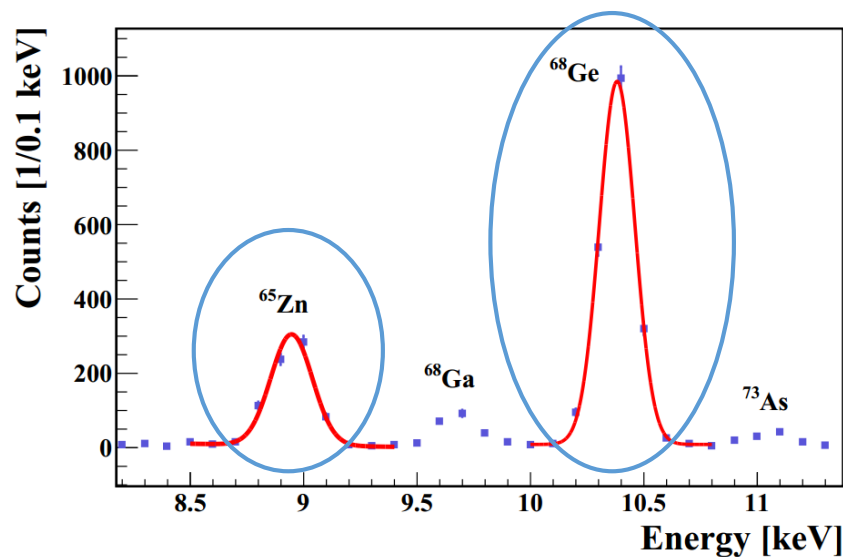
处理实验数据得到灵敏区域 (Bulk) 能谱;

利用统计性较好的 ^{65}Zn 、 ^{68}Ge 两个峰进行参数确定, 其他峰进行验证;

CDEX-1B本底数据的上升时间分布



主要特征峰的拟合



锗晶体内宇生放射性模拟

➤ 正确性检验

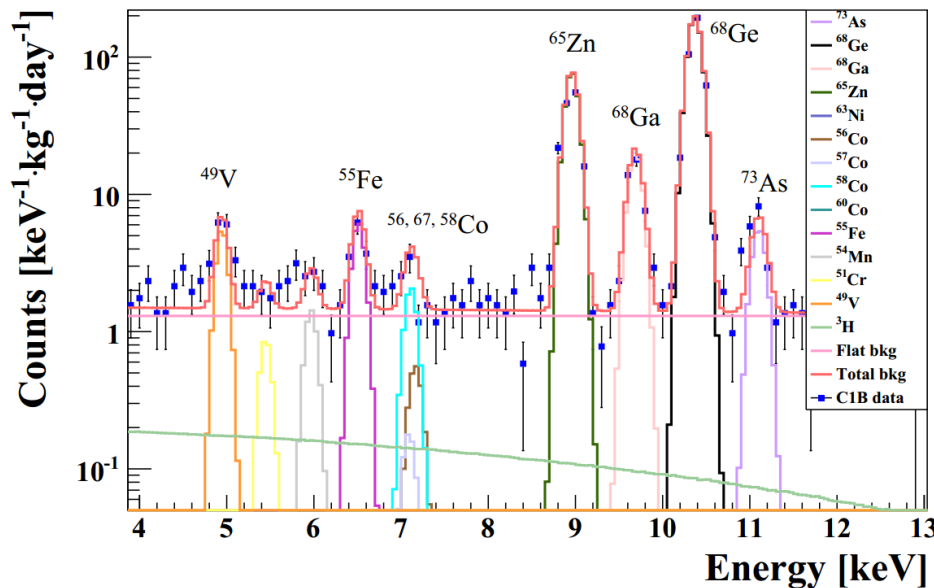
- 用CDEX-1B的实验数据进行验证

计算结果和实验测量结果吻合得很好。

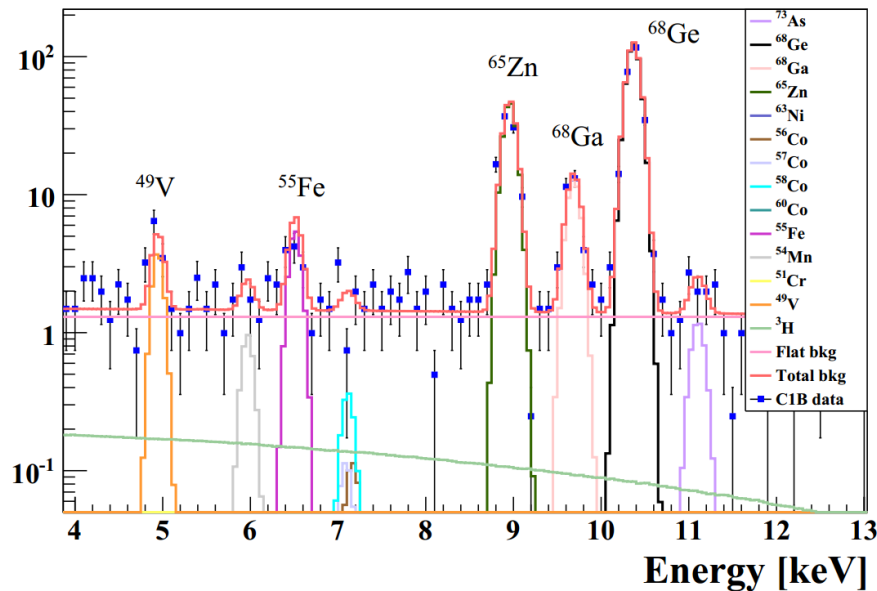
模拟结果与实验数据比较

Radionuclide	Measured X-Ray Energy (keV)	Measured Peak Count	Simulated Peak Count
^{68}Ge	10.38 ± 0.01	1919.4 ± 68.8	1918.7
^{68}Ga	9.68 ± 0.01	190.8 ± 23.9	203.3
^{65}Zn	8.95 ± 0.01	685.8 ± 38.7	689.4
$^{56,57,58}\text{Co}$	7.14 ± 0.02	21.4 ± 17.2	22.2
^{55}Fe	6.50 ± 0.02	44.1 ± 16.9	55.4
^{49}V	4.95 ± 0.02	52.3 ± 19.6	46.5

2014: 03-05



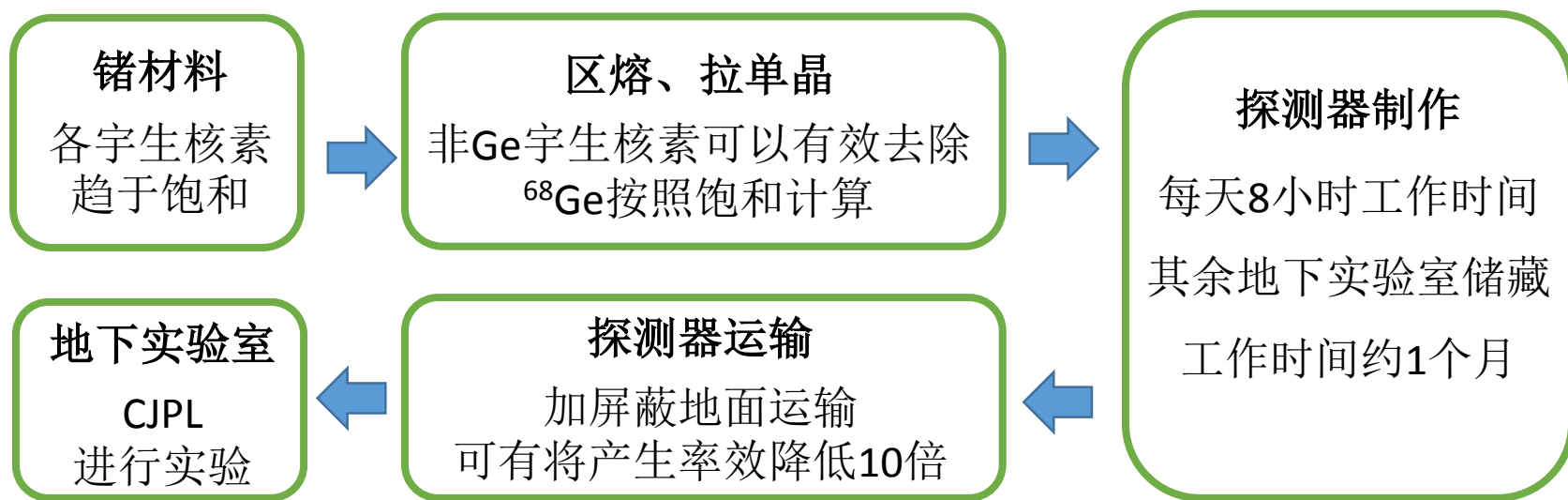
2014: 09-11



高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估

➤ 探测器制作运输方案

1、天然锗



过程	经历时间	核素状态
原料		均趋于饱和
区熔、拉单晶、探测器制作	30天（有效时间10天）	除 ^{68}Ge 外其余核素开始计算
探测器运到CJPL	30天	有屏蔽运输

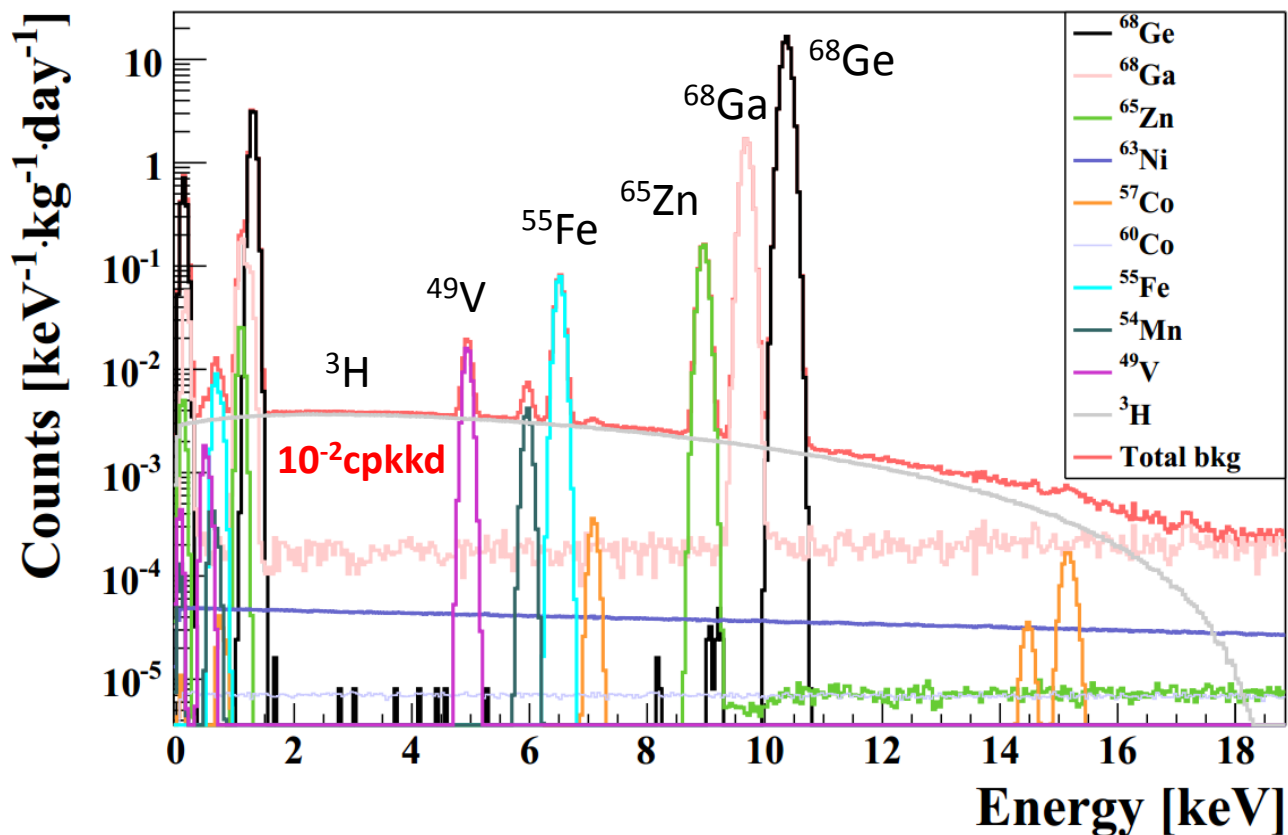
高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估

➤ 暗物质能区的灵敏度分析

1、天然锗

- 宇生核素特征峰，以 ^{68}Ge 为主
- 连续能谱，以 ^3H 为主

地面探测器制作1个月，运输1个月，地下冷却3年能谱



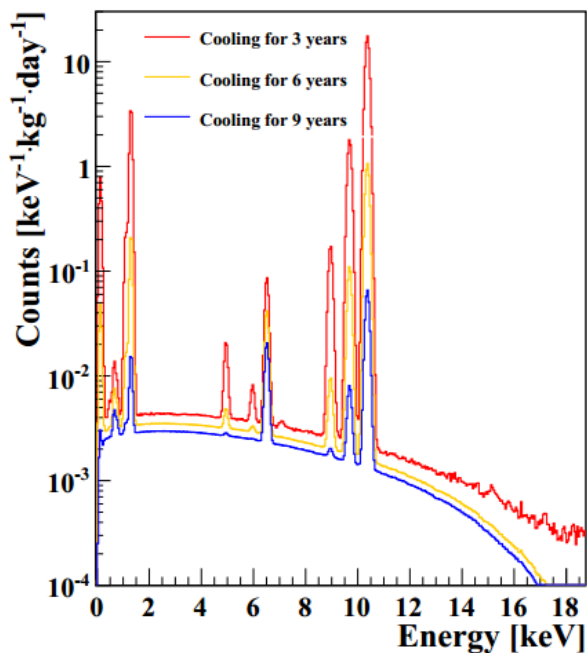
高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估

➤ 暗物质能区的灵敏度分析

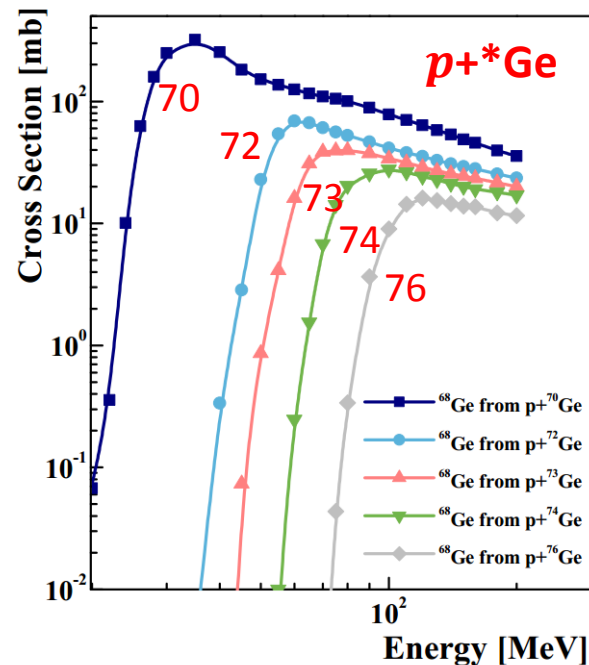
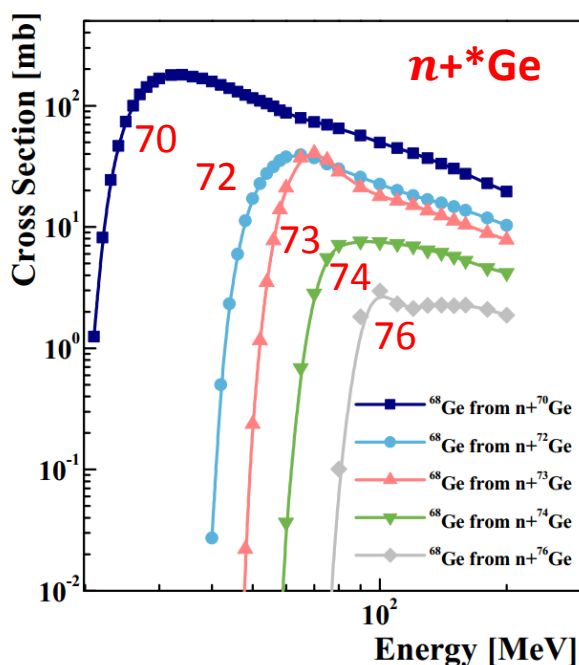
1、天然锗

^{68}Ge 本底降低方法：1) 增加冷却时间 2) 减少产生率

改变冷却时间



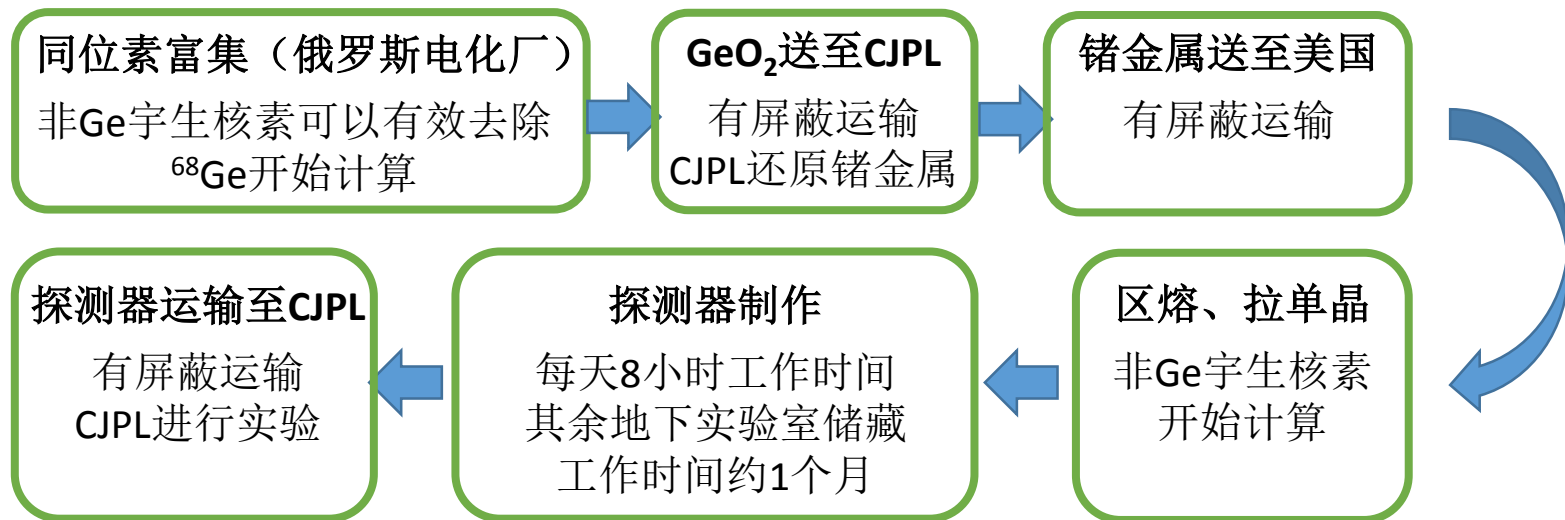
^{68}Ge 的产生截面



高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估

➤ 探测器制作运输方案

2、 ^{76}Ge 富集锗



过程	经历时间	核素状态
GeF ₄ 富集、转化成GeO ₂ 储存	40天	^{68}Ge 开始计算
GeO ₂ 运输至CJPL	15天	有屏蔽运输
金属锗运输到美国	30天	有屏蔽运输
区熔、拉单晶、探测器制作	30天 (有效时间10天)	除 ^{68}Ge 外其余核素开始计算
探测器运到CJPL	30天	有屏蔽运输

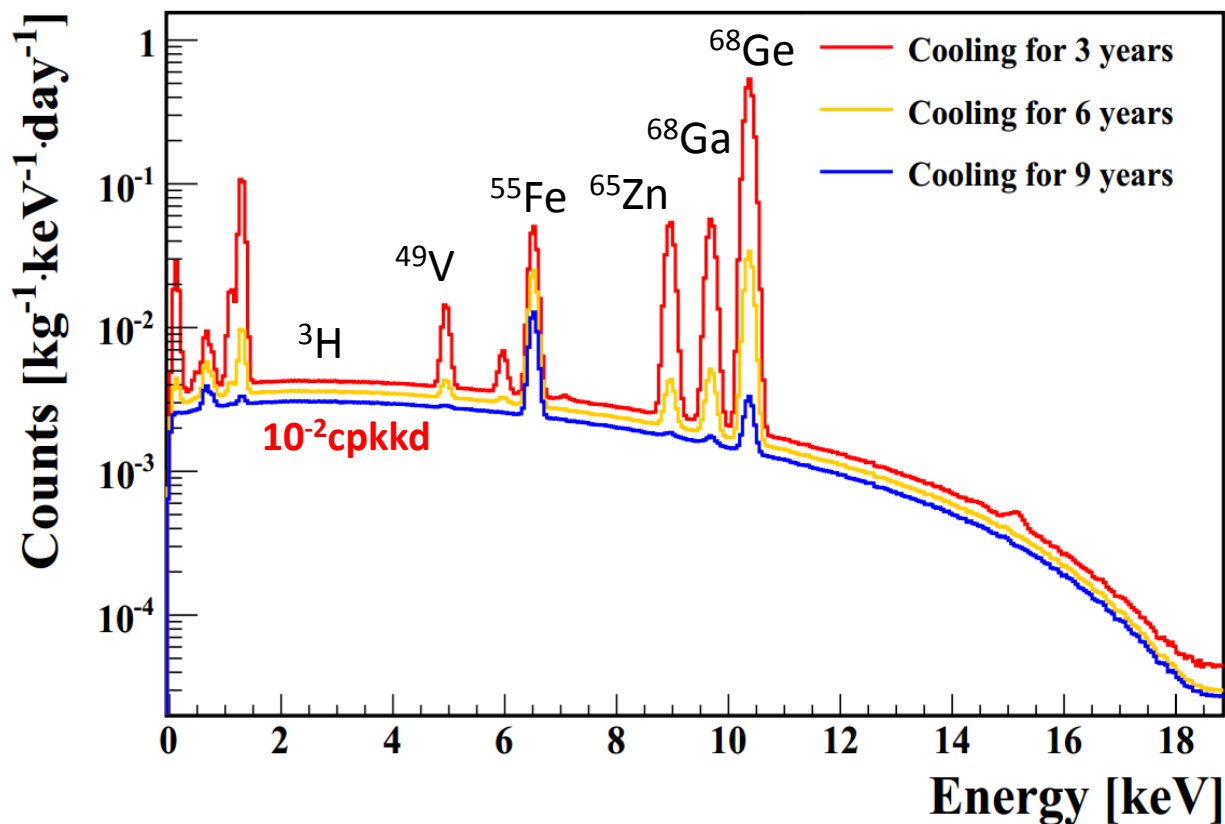
高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估

➤ 暗物质能区的灵敏度分析

2、 ^{76}Ge 富集锗

- ^{68}Ge 显著压低约2个量级，特征峰可通过拟合扣掉；
- ^3H 连续本底改善不明显，连续能谱无法扣除；
- 10^{-2} cpkkd依然无法满足吨级暗物质实验的本底要求。

依据以上时间节点，地下分别冷却3/6/9年能谱

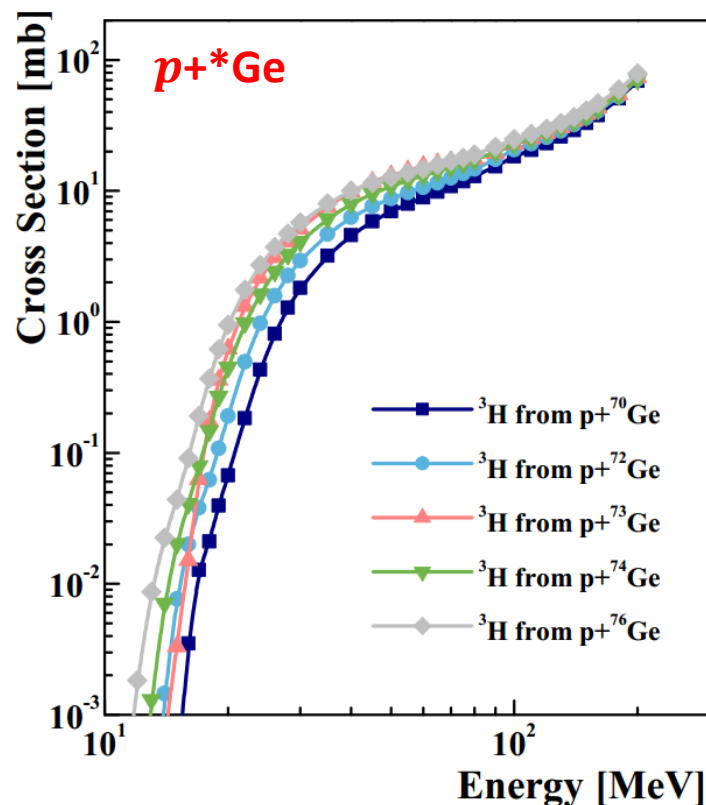
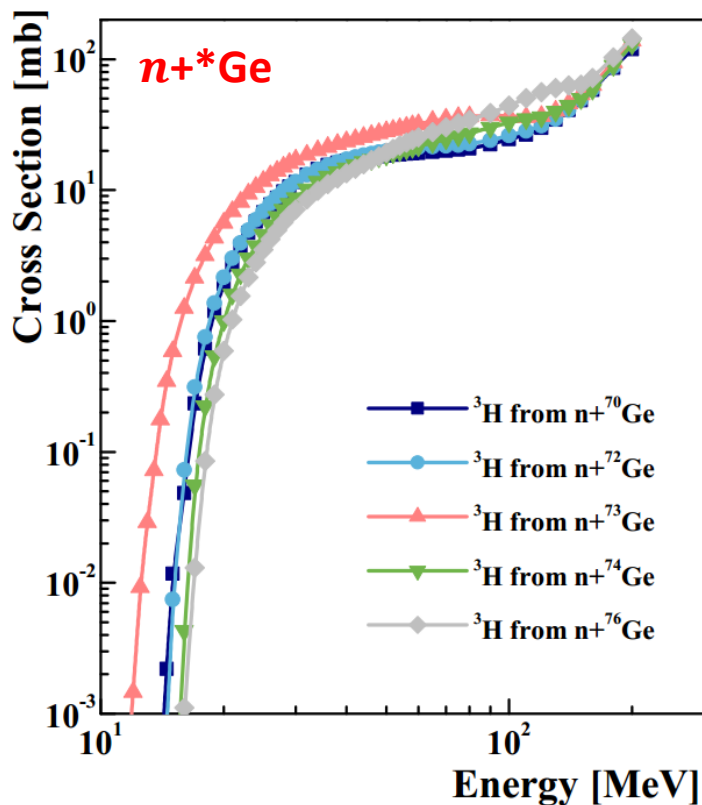


高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估

➤ 暗物质能区的灵敏度分析

2、 ^{76}Ge 富集锗

^3H 的产生截面于Ge的各同位素差异不明显

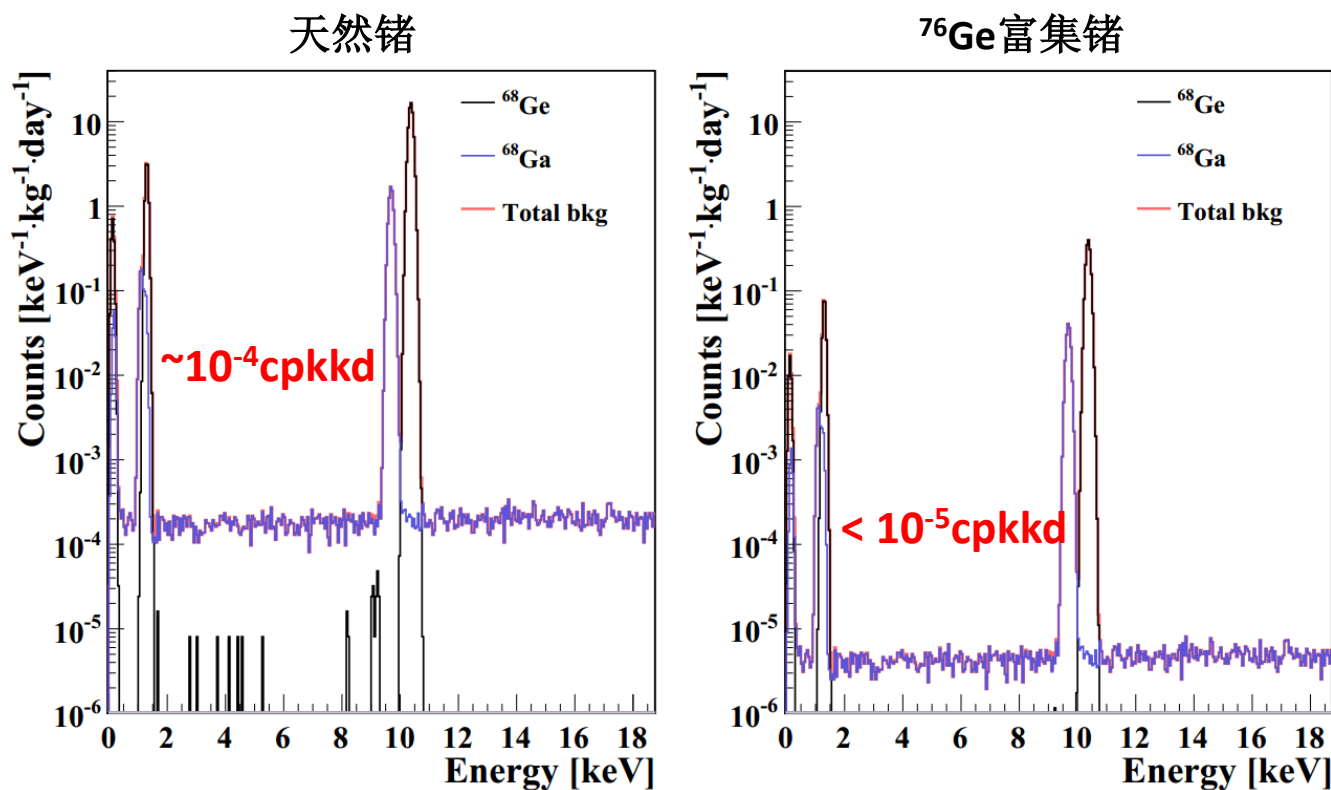


高纯锗暗物质实验中的宇生本底评估

➤ 暗物质能区的灵敏度分析

3、在地下实验室进行晶体生长及探测器制作

- 除 ^{68}Ge 、 ^{68}Ga 外，包括 ^3H 在内的其他长半衰期宇生放射性核素均降低到了可以忽略的水平。

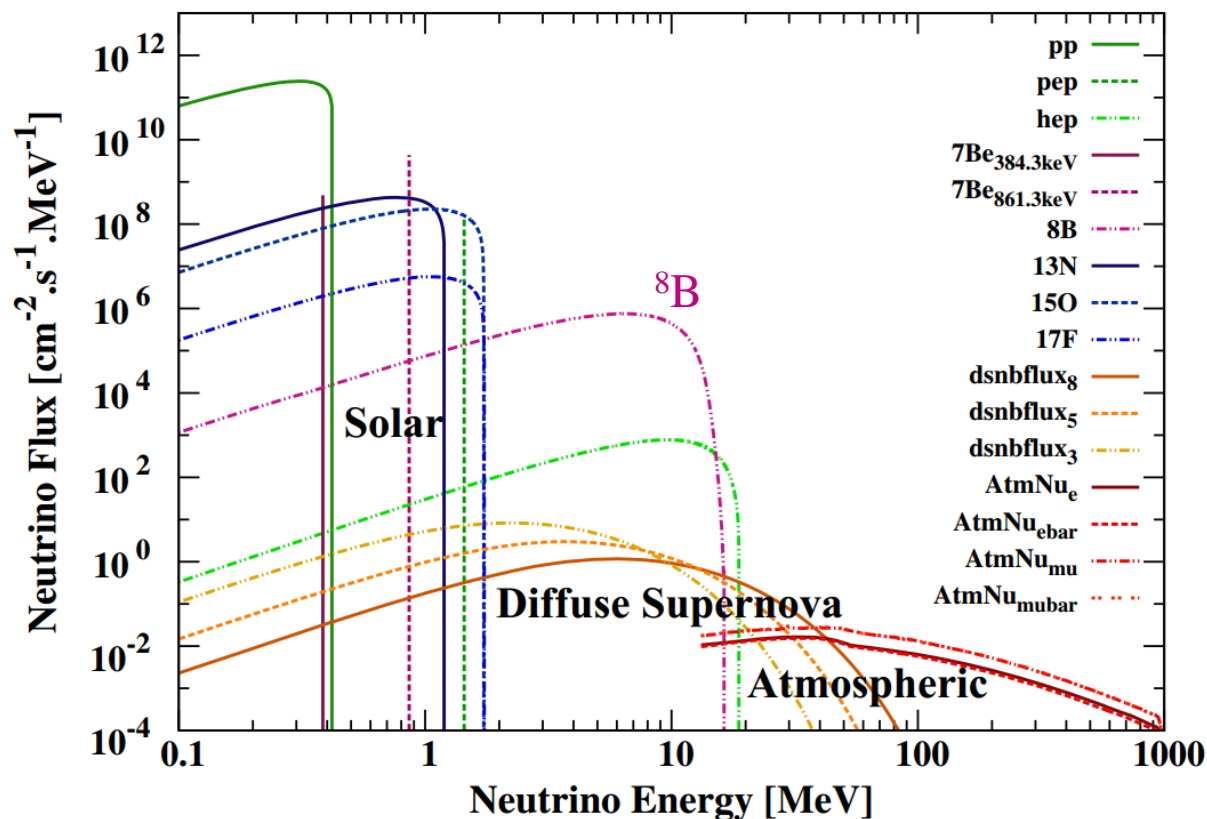


其他稀有事例探测实验

► 低本底下的新物理

1、太阳中微子探测

- 暗物质直接探测实验组的中微子本底能谱，对于底阈值点电极高纯锗探测器来说，随着阈值和本底的降低，最有可能先探测到 ^8B 太阳中微子。

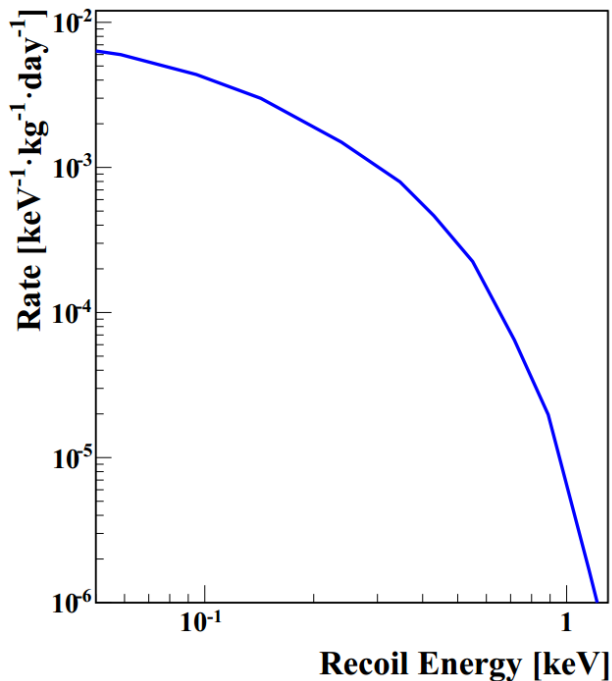


➤ 低本底下的新物理

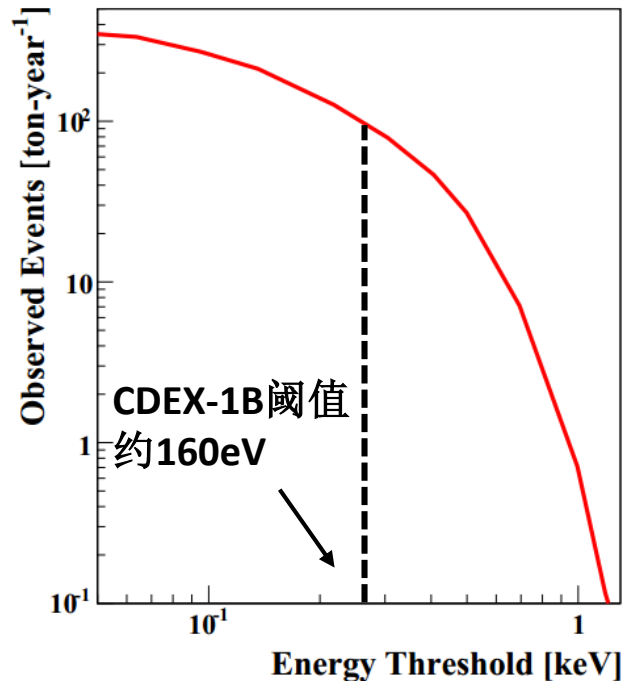
1、太阳中微子探测

- 当本底水平达到 2×10^{-3} cpkkd, 探测器阈值达到200 eV的时候, 将不可避免的触碰到中微子台阶。

高纯锗探测器的太阳中微子台阶



太阳中微子事例率与探测器阈值的关系图



► 低本底下的新物理

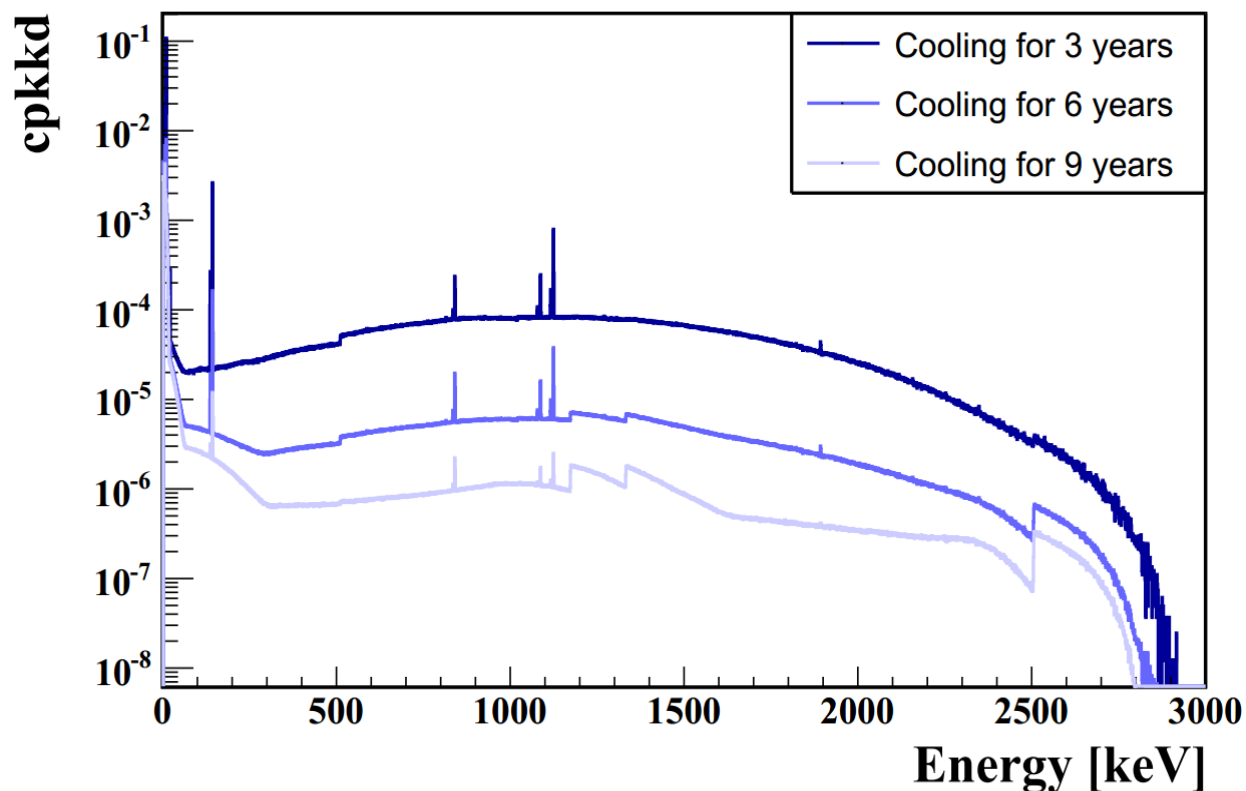
2、无中微子双 β 衰变探测

- 主要本底贡献来自于 ^{60}Co (β^-)

^{68}Ga (EC or β^+),

可以通过多点事例甄别进行进一步降低。
有希望到 10^{-7} cpk/d, 结合中微子有效质量, 可以确定正反序。

依据 ^{76}Ge 富集过程, 高能区域在3/6/9年冷却时间下的能谱



其他稀有事例探测实验

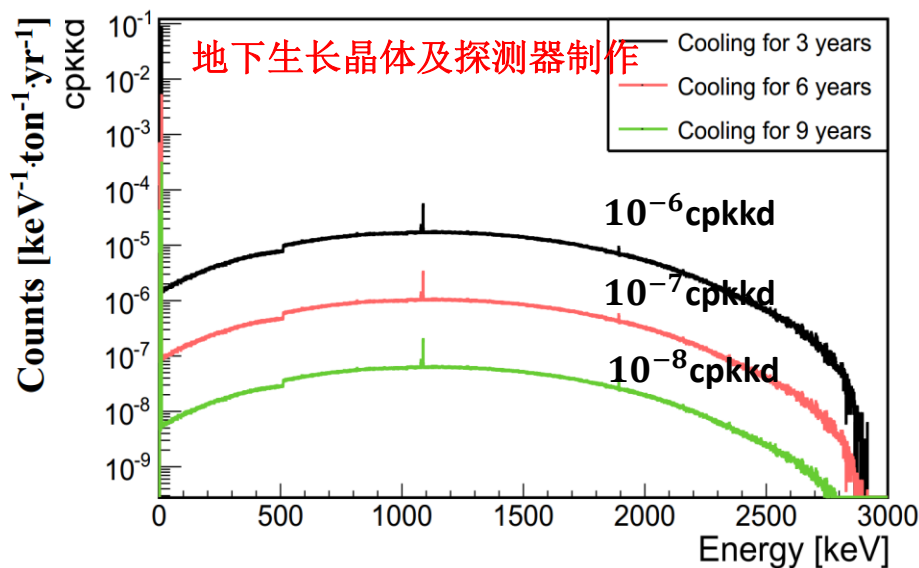
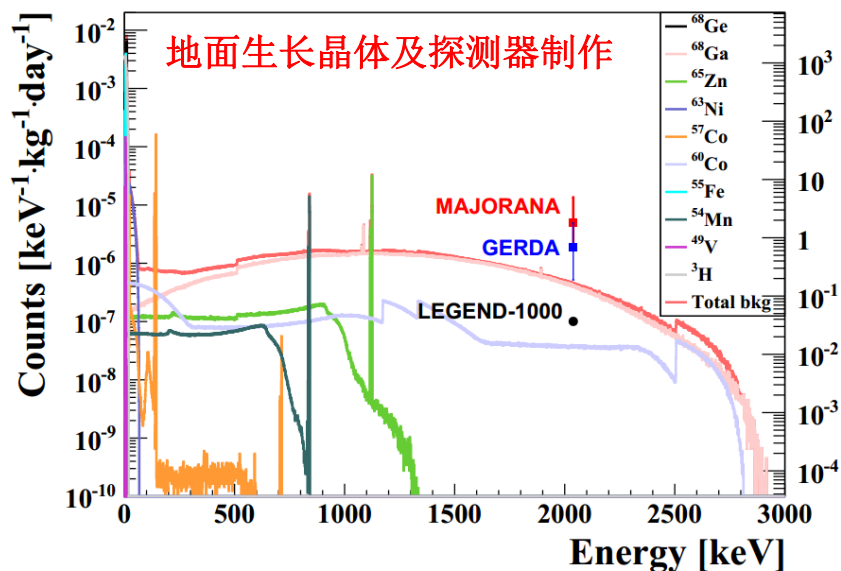
➤ 低本底下的新物理

2、无中微子双β衰变探测

- 目前国际水平

GERDA: $1.9^{+3.0}_{-1.4} \times 10^{-6}$ cpkkd
Majorana: $4.9^{+8.5}_{-3.0} \times 10^{-6}$ cpkkd
LEGEND-1000: 10^{-7} cpkkd

- 地下生长晶体及探测器制作
(仅包含富集40天、运输45天)



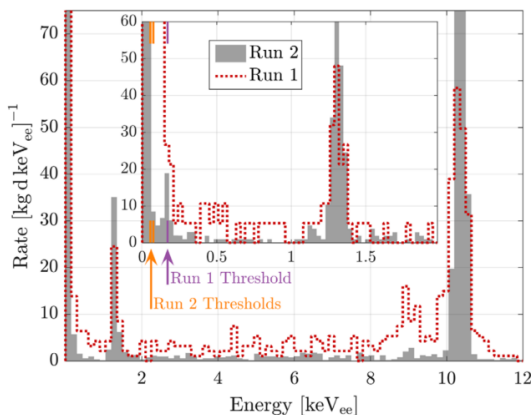
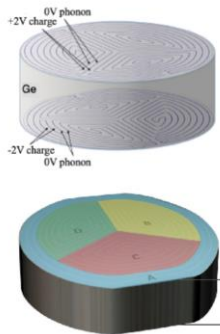
- 在暗物质探测及 $0\nu\beta\beta$ 探测等稀有事例探测实验中，宇生本底分析和抑制非常关键；
- 通过Geant4与CRY建立了一套完整的宇生本底评估方案，计算得到的宇生核素产额可以与已有实验很好吻合，有利于对未来吨级暗物质实验的宇生本底进行预测；
- 在低能区的主要宇生本底贡献来自于 ^{68}Ge 和 ^{68}Ga 的特征X射线峰以及 ^3H 的 β^- 衰变连续谱。在2 MeV高能区的主要宇生本底贡献来自于 ^{68}Ga 的 β^+ 衰变以及 ^{60}Co 的 β^- 衰变连续谱。
- 长时间的地下冷却是降低宇生本底的一种方法，长远来看在地下进行晶体生长及探测器制作将会是未来实验发展的必然方向。

实验本底研究进展

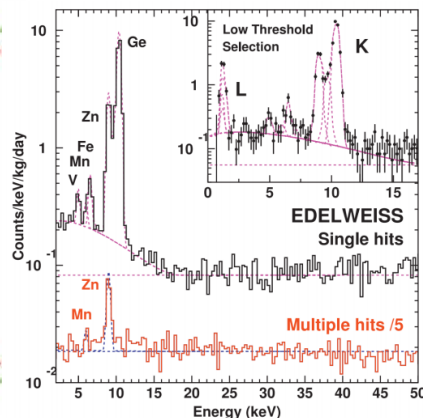
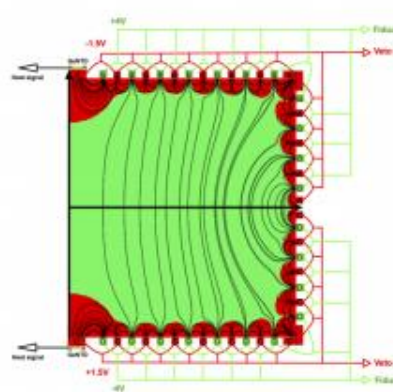
高纯锗探测器的本底水平: **CDEX-1T目标 10^{-3} cts/(keV·kg·day) @ 1 keV**

暗物质实验:

CDMS实验 1~5 cpkkd @ 1 keV

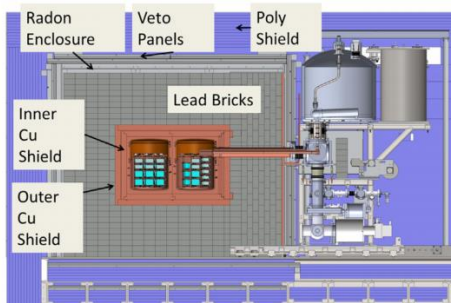


EDELWEISS实验 ~ 0.2 cpkkd @ 1 keV

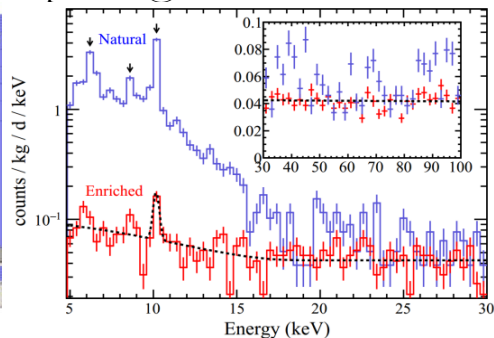


无中微子双贝塔 ($0\nu\beta\beta$) 衰变实验:

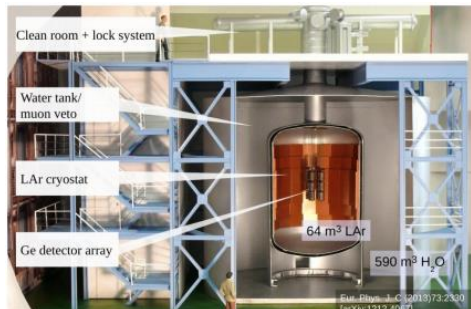
MAJORANA实验 ~0.1 cpkkd @ 5 keV



2018/6/22

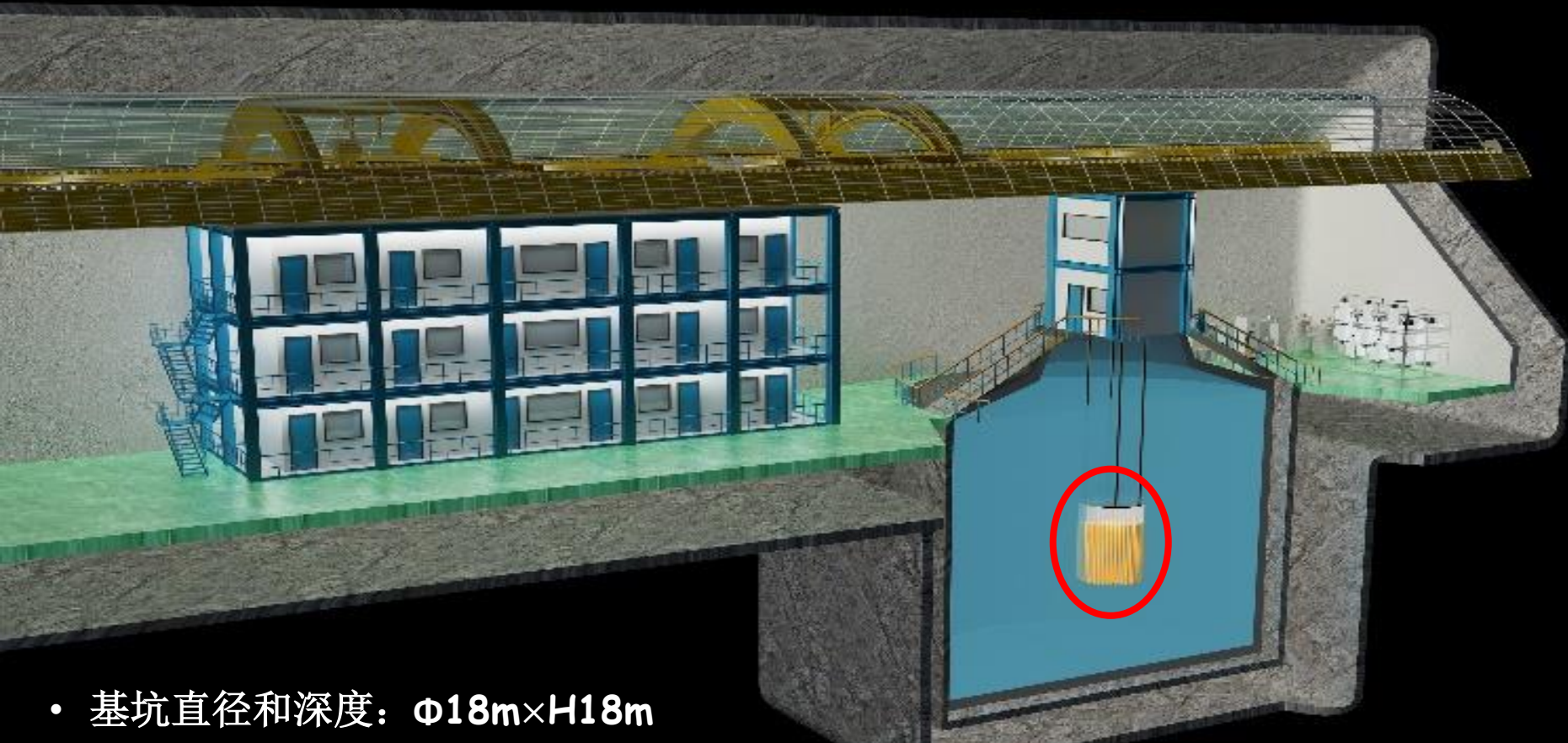


GERDA实验 ~0.009 cpkkd @ 500 keV



25

➤ CDEX-1T吨级高纯锗阵列探测器：暗物质及无中微子双 β 衰变探测



- 基坑直径和深度： $\Phi 18\text{m} \times H18\text{m}$
- 液氮容器： $\Phi 16\text{m} \times H19\text{m}$
- 液氮保温层：1.5m
- 液氮屏蔽体： $\Phi 13\text{m} \times H13\text{m}$

- 液氮冷却/屏蔽系统
- 极低本底环境
- 高纯锗阵列增大靶物质质量

➤ 实验本底来源分析:

周围环境中的放射性:

- 宇宙线 μ 子: CJPL的 μ 子通量: $(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (可忽略)
- 环境中子本底: μ 致中子 $\sim 10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (可忽略)
(α, n)中子、 ^{238}U 自发裂变中子 $\sim 10^{-5} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 环境伽马本底: 岩石、混凝土及液氮恒温器中的天然放射性 (U系、Th系、 ^{40}K)

经过液氮屏蔽后的环境中子本底 10^{-8} cpkkd @ 2~4 keV

环境伽马本底 10^{-6} cpkkd @ 2~4 keV

液氮自身本底: ^7Be 、 ^{85}Kr 、 ^{222}Rn , 纯化后 10^{-4} cpkkd @ 2~4 keV

探测器结构材料和电子学放射性:

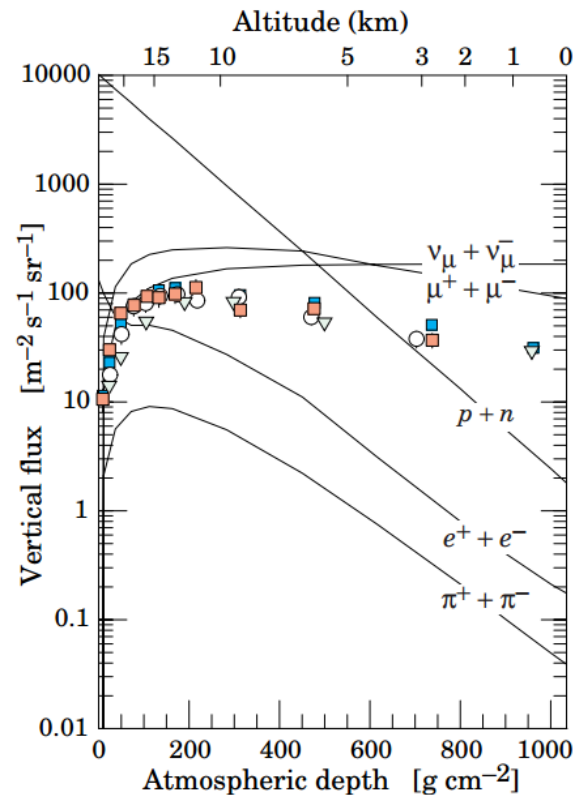
- 探测器支撑材料、电子学器件的宇生及天然放射性
电解铜、材料筛选等优化后 10^{-3} cpkkd @ 2~4 keV

锗晶体内部宇生放射性:

- 长半衰期宇生放射性核素 (^{68}Ge 、 ^{65}Zn 、 ^3H 等)

➤ 宇宙线

- 相同海拔，通量增量在几倍的范围内；
- 相同纬度，通量增量往往超过两个数量级，随之而来的是宇生核素产额的急剧增加，**避免探测器的高空运输。**
- 宇宙射线粒子与各同位素反应产生放射性核素的截面不同，同位素丰度也会影响某些核素的产生率。



	Krasnoyarsk (N 56°)		Strasbourg (N 49°)		Beijing (N 40°)	
	0 m	11300 m	0 m	11300 m	0 m	11300 m
Neutron	3.400×10^{-3}	1.969	2.982×10^{-3}	1.415	2.200×10^{-3}	8.793×10^{-1}
Proton	2.169×10^{-4}	1.453×10^{-1}	2.043×10^{-4}	1.044×10^{-1}	1.657×10^{-4}	6.457×10^{-2}
Muon	1.191×10^{-2}	8.960×10^{-2}	1.191×10^{-2}	8.420×10^{-2}	1.182×10^{-2}	7.122×10^{-2}
Gamma	1.732×10^{-2}	2.755	1.722×10^{-2}	2.534	1.682×10^{-2}	2.131

➤ 参数确定

- 由于CDEX-1B探测器的历史清楚并且较为简单，可以利用CDEX-1B的本底数据对模拟结果进行验证。

2012年预定并在法国CANBERRA制作 -- P_1 、 t_f



2013年11月运抵北京（约10小时飞机运输） -- P_2 、 t_t



在CJPL调试并在中子刻度实验前采集的数据



数据编号	冷却时间 (day) t_c	采数起止日期	采数时间 (day)	活时间 (day)
1	147	20140327 ~ 20140520	55	51.3
2	331	20140927 ~ 20141108	42	40.4

➤ 未来吨级实验中的宇生放射性评估:

2、对于 $0\nu\beta\beta$ 探测 (2MeV附近能区)

(2)富集 ^{76}Ge 的锗 Enriched Ge

可以利用多点事例甄别有效降低高能区本底水平。在2MeV附近,对于 ^{60}Co 来说多点事例率大于90%,对于 ^{68}Ga 来说多点事例率大于70%。

