

# $^{76}\text{Ge}-0\nu\beta\beta$ 实验综述和CDEX-300v

杨丽桃

清华大学

CDEX合作组



“无中微子双贝塔衰变”研讨会,  
2021年5月19日-23日, 广东 珠海

CJPL 

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

清华大学·雅砻江流域水电开发有限公司

# 中微子性质研究



- 中微子性质研究是物理学重大前沿科学问题；
- 中微子质量不为零，突破了粒子物理标准模型框架；
- 中微子性质研究重要课题：
  - ✓ 中微子绝对质量
  - ✓ 中微子质量层级
  - ✓ 中微子是否是自身反粒子
  - ✓ .....

## Nobel Prize in Physics 2015

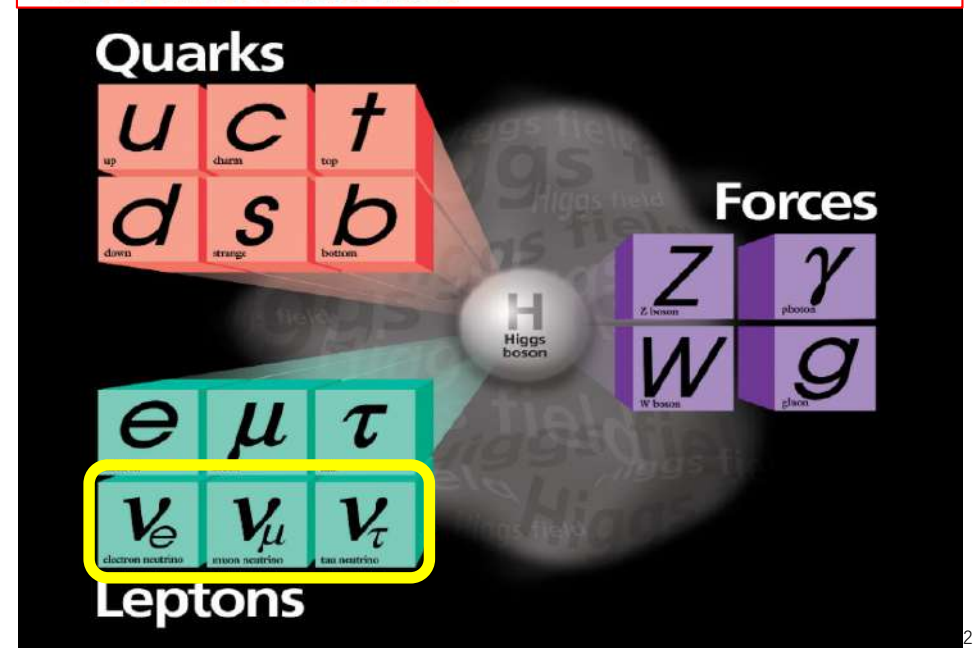


Takaaki Kajita



Arthur B. McDonald

“For the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”





# $0\nu\beta\beta$ 实验物理目标

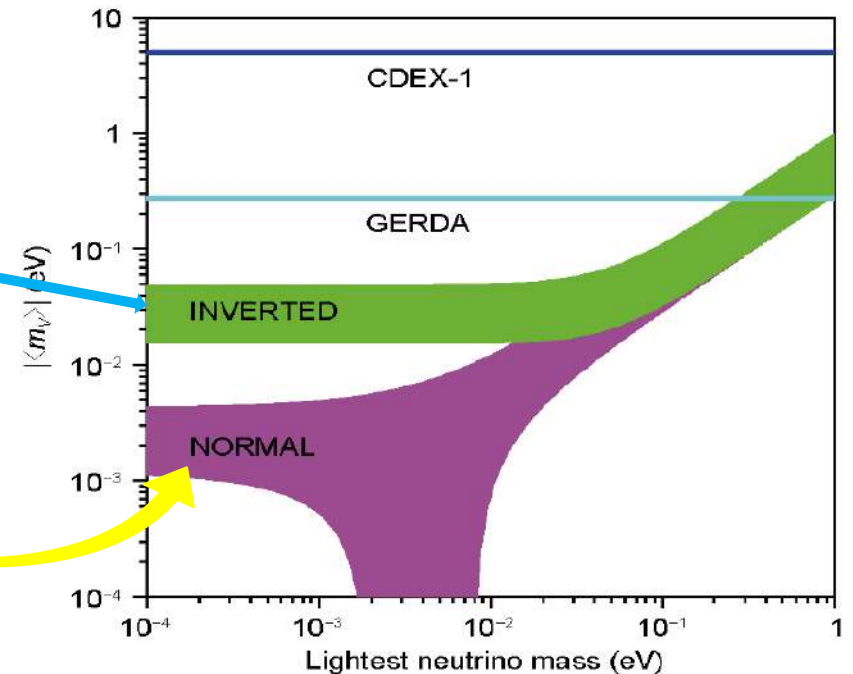
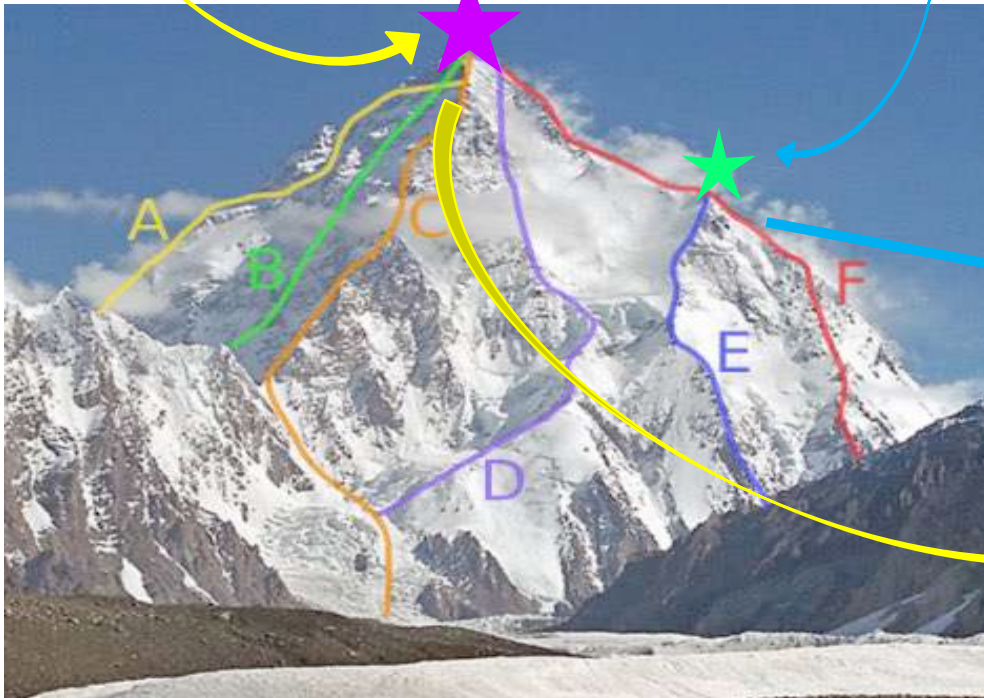


- $0\nu\beta\beta$ 实验物理目标:

- ✓ 确定中微子是否是其自身反粒子 ( $<10\text{meV}$ ,  $\rightarrow 5\text{meV}$ ,  $\rightarrow 1\text{meV}$ )

- ✓ 中微子质量层级 ( $\sim 14\text{meV}$ ) (多个实验: JUNO, DUNE等)

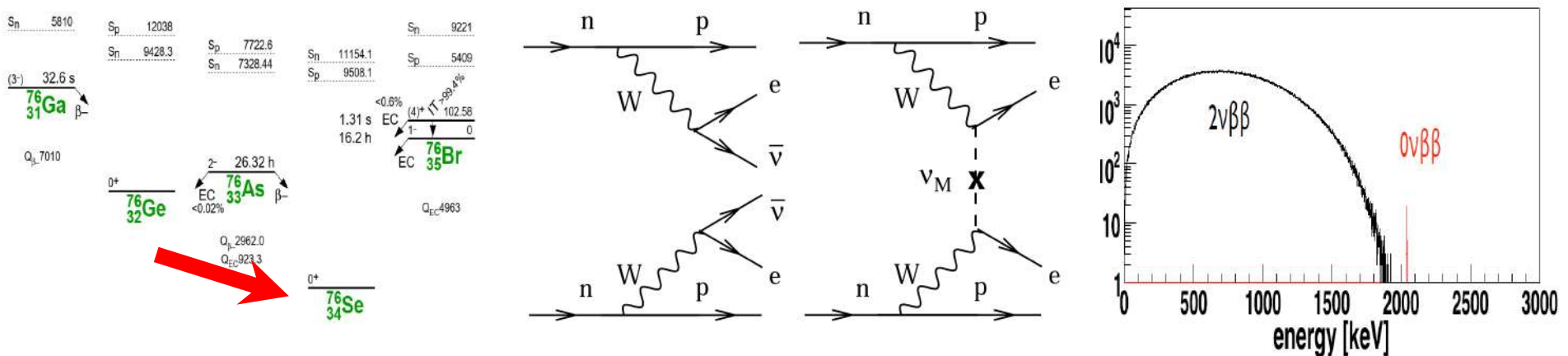
- 需要理论和实验紧密结合, 推动 $0\nu\beta\beta$ 研究不断发展。





# $0\nu\beta\beta$ 实验方法

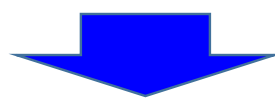
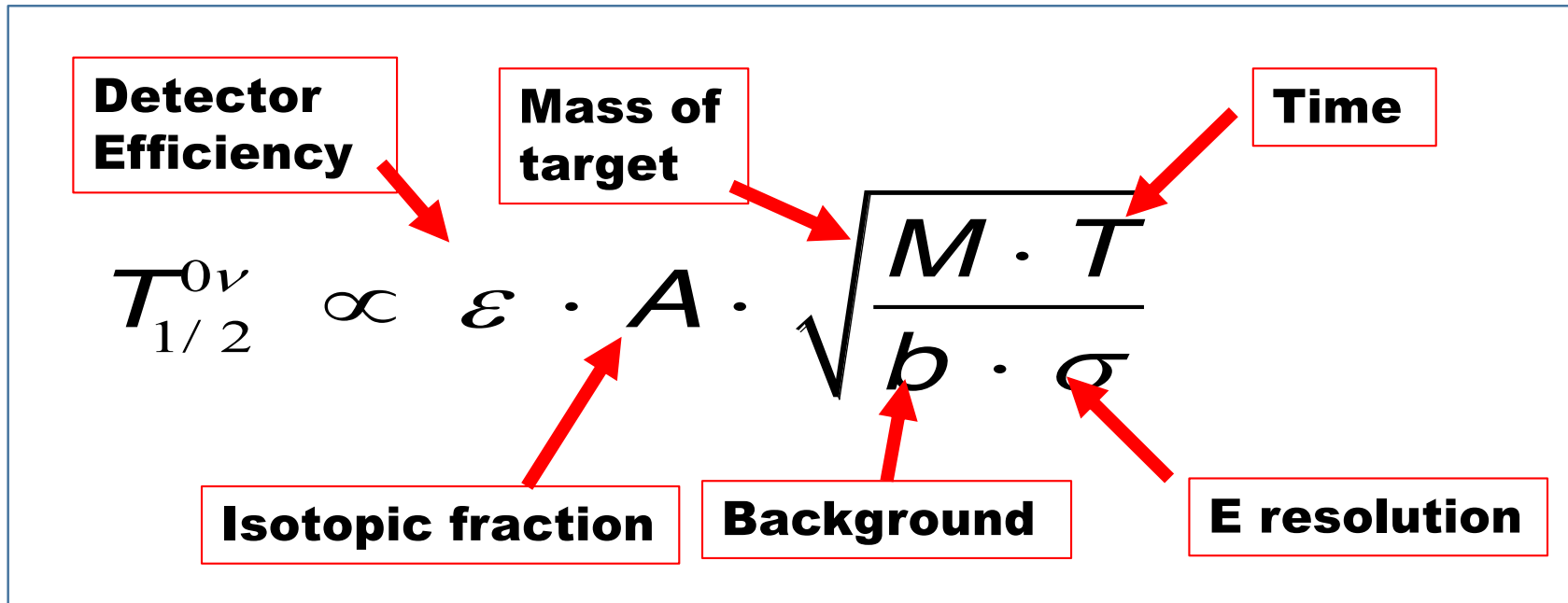
- 实验测量可能的 $0\nu\beta\beta$ 衰变事例，确认是否发生了 $0\nu\beta\beta$ 衰变过程；
- 实验已经测量到多个同位素的 $2\nu\beta\beta$ 衰变事例，并且给出了对应的 $2\nu\beta\beta$ 半衰期的实验值；
- 对于本底控制和信号甄别技术要求极其苛刻。即使U、Th及宇生等环境和材料本底控制得好， $2\nu\beta\beta$ 事例将不可避免的成为无法完全消除的物理本底。



# $0\nu\beta\beta$ 核素半衰期和中微子质量



- 实验测量可能的 $0\nu\beta\beta$  事例



$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu}(E_0, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

Labels: **Phase Space**, **Matrix**, **Effective  $m_\nu$**

# $0\nu\beta\beta$ 实验可能同位素



- 经过数十年的发展，目前最重要的 $0\nu\beta\beta$ 实验的候选同位素包括： $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ , ...;
- 基于这些同位素的 $0\nu\beta\beta$ 实验技术可以有不同的选择：

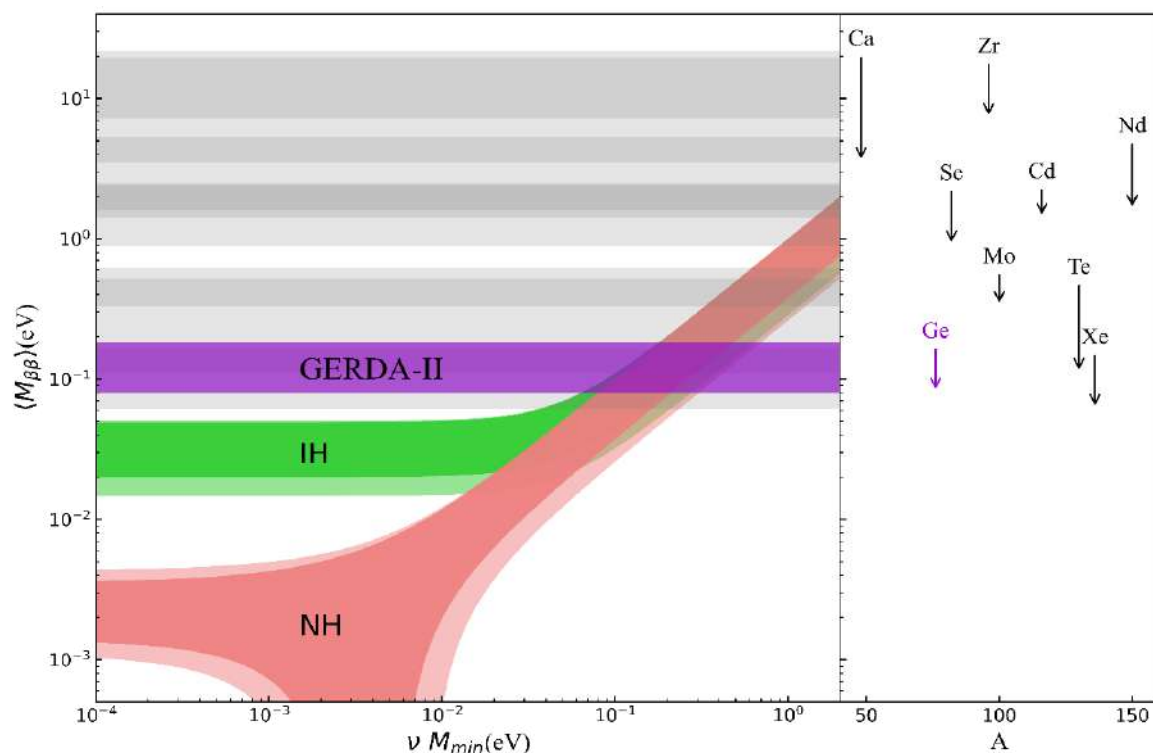
Isotope	$Q_{\beta\beta}$ (KeV)	Natural abundance (%)	$2\nu\beta\beta$ Half-life ( $10^{21}$ year)	$0\nu\beta\beta$ Half-life ( $10^{26}$ year)	Detector
$^{76}\text{Ge}\rightarrow^{76}\text{Se}$	2039	7.8	1.926	1.8 (Gerda)	HP $^{76}\text{Ge}$
$^{130}\text{Te}\rightarrow^{130}\text{Xe}$	2528	34.5	0.820	0.15 (CUORE)	$^{130}\text{TeO}_2$
$^{136}\text{Xe}\rightarrow^{136}\text{Ba}$	2479	8.9	2.165	1 (Kamland-Zen)	LS( $^{136}\text{Xe}$ )、TPC
$^{48}\text{Ca}\rightarrow^{48}\text{Ti}$	4271	0.187	0.064		
$^{82}\text{Se}\rightarrow^{82}\text{Kr}$	2995	9.2	0.096	0.05 (CUPID-0)	ZnSe、TPC
$^{96}\text{Zr}\rightarrow^{96}\text{Mo}$	3350	2.8	0.024		
$^{100}\text{Mo}\rightarrow^{100}\text{Ru}$	3034	9.6	0.007		LMO
$^{150}\text{Nd}\rightarrow^{150}\text{Sm}$	3367	5.6	0.009		

# $0\nu\beta\beta$ 实验可能同位素



- 一些 $0\nu\beta\beta$ 实验给出了具有竞争力的实验结果： $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{130}\text{Te}$ 等；
- 基于这些同位素的 $0\nu\beta\beta$ 实验技术可以有不同的选择：半导体探测器、超低温量热器、TPC (不同信号读出方式)、LS-doped, .....。

Experiment	Iso	Exposure [kg-yr]	$T_{1/2}^{0\nu}$ [ $10^{25}$ yr]	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ [meV]
GERDA [4]	$^{76}\text{Ge}$	127.2	18	80 – 182
MAJORANA [2]	$^{76}\text{Ge}$	26	2.7	200 – 433
KamLAND-Zen [1]	$^{136}\text{Xe}$	594	10.7	61 – 165
EXO [87]	$^{136}\text{Xe}$	234.1	3.5	93 – 286
CUORE [88]	$^{130}\text{Te}$	115.9	1.5	110 – 520



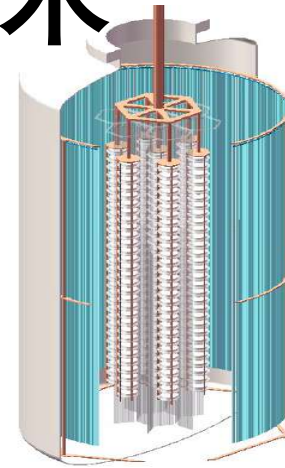


# $0\nu\beta\beta$ 实验主要技术



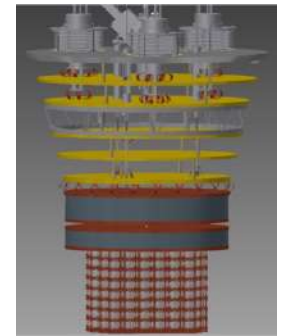
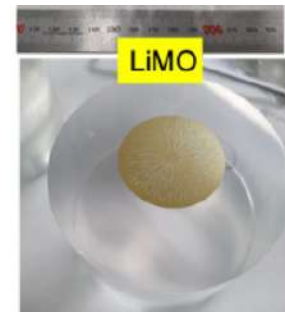
- 高纯锗探测器技术 ( $^{76}\text{Ge}$ )

---Gerda, Majorana, **CDEX**, LEGEND.....



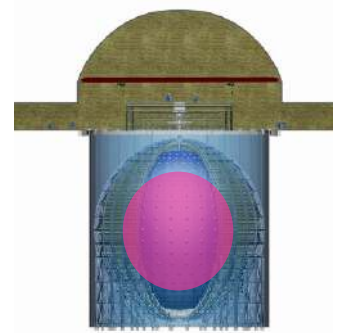
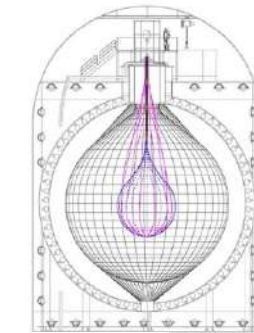
- 闪烁体量能器技术 ( $\text{Li}^{100}\text{MO}$ 、 $^{130}\text{TeO}_2$ )

---**CUPID-CJPL**, CUPID, CUORE, **AMORE**,.....



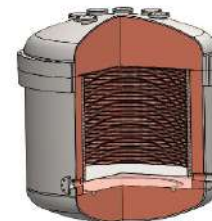
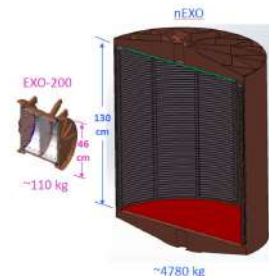
- 液体闪烁体 ( $^{136}\text{Xe}$ 、 $^{130}\text{Te}$ )

--- Kamland-Zen, SNO+, **JUNO- $0\nu\beta\beta$** ,.....



- 时间投影室 (TPC) ( $^{136}\text{Xe}$ 、 $^{82}\text{Se}$ )

---nEXO, **PandaX**, **NvDEx**, .....



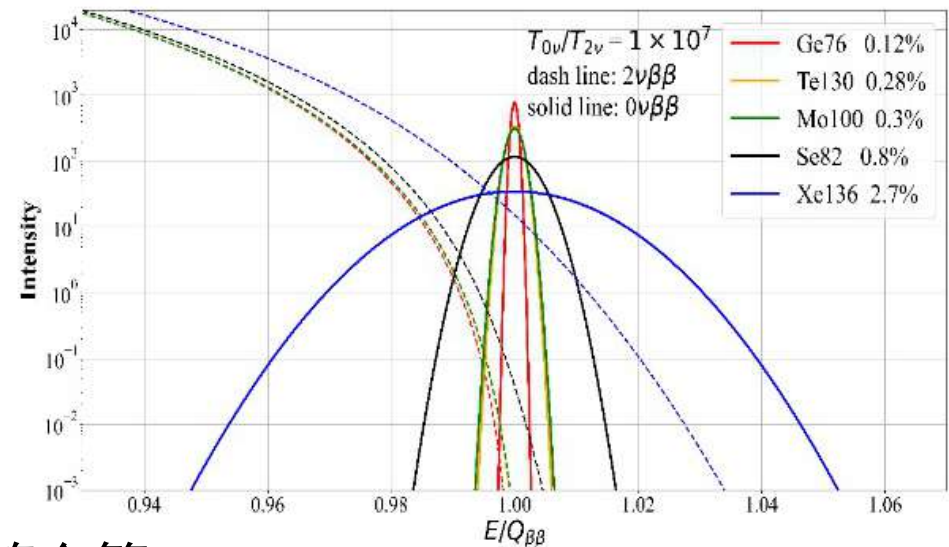


# $^{76}\text{Ge}$ $0\nu\beta\beta$ 实验



## ■ 特点:

- ✓ 靶核=探测器
- ✓ 锗晶体纯度极高 (12-13N)
- ✓ 能量分辨率极高:
  - ✓  **$\sim 0.1\%$ @ 2MeV(2.5keV FWHM)**
- ✓  $^{76}\text{Ge}$ 富集到86%以上, 技术稳定可靠
- ✓ 脉冲波形甄别、单点/多点事例、反符合等



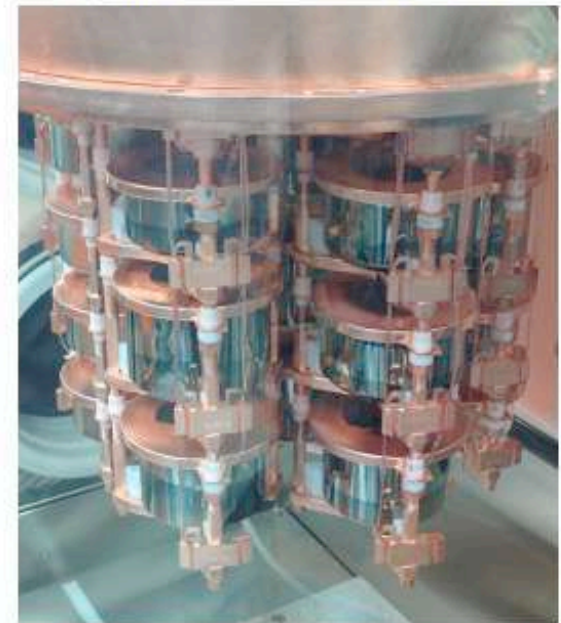
CDEX-1



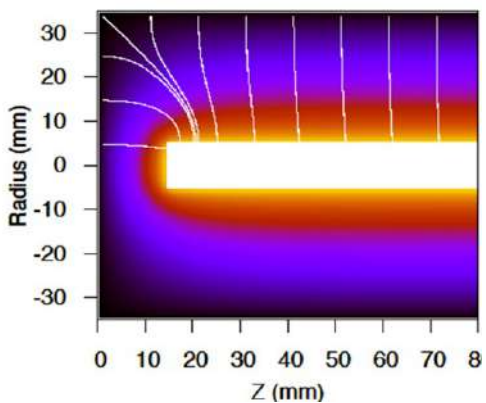
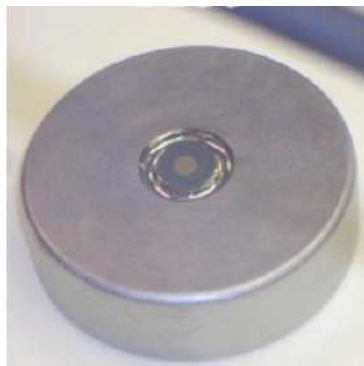
GERDA Phase II



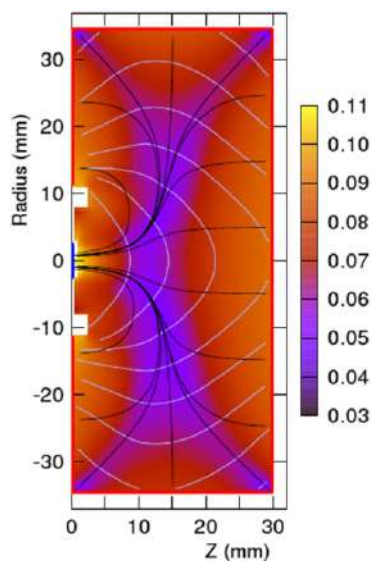
MAJORANA DEMONSTRATOR



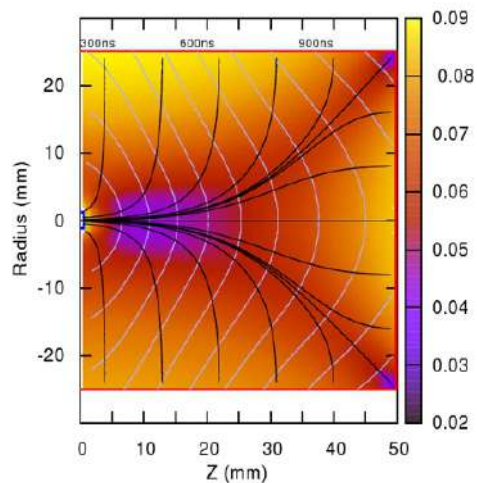
# 高纯锗探测器技术



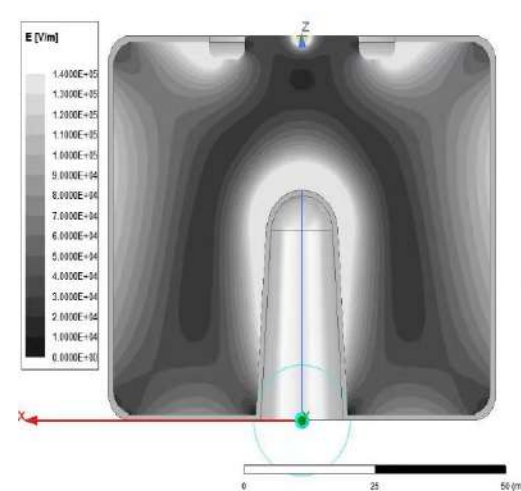
**Co-axial**



**BEGe**



**PCGe**



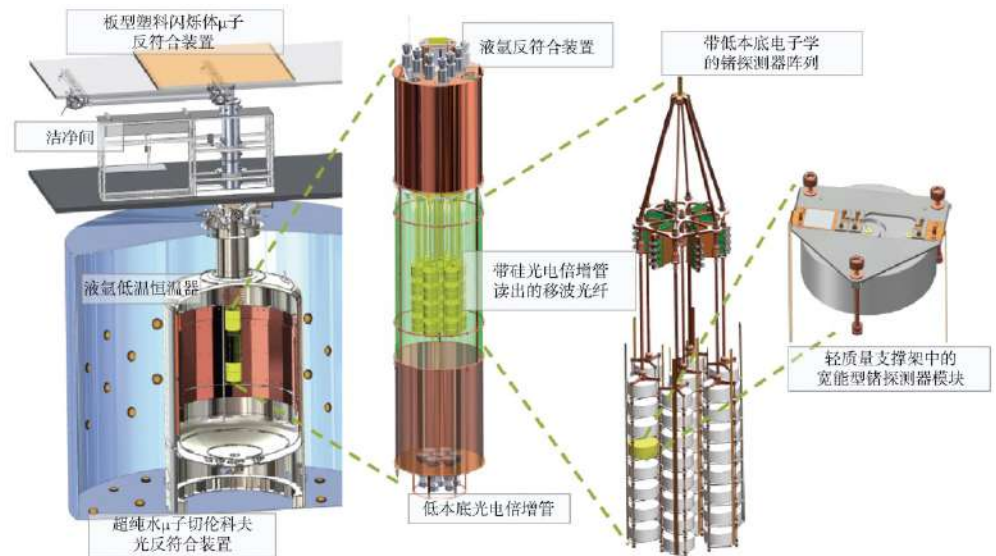
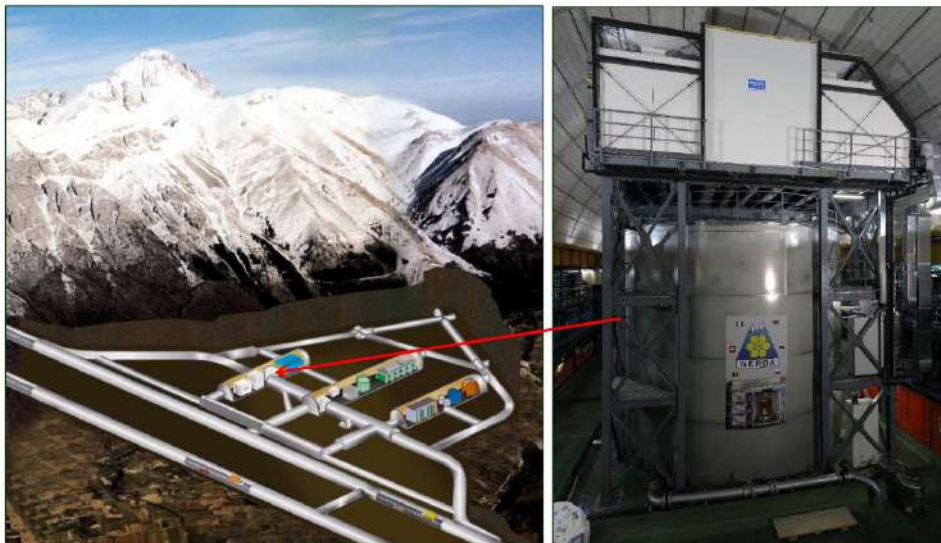
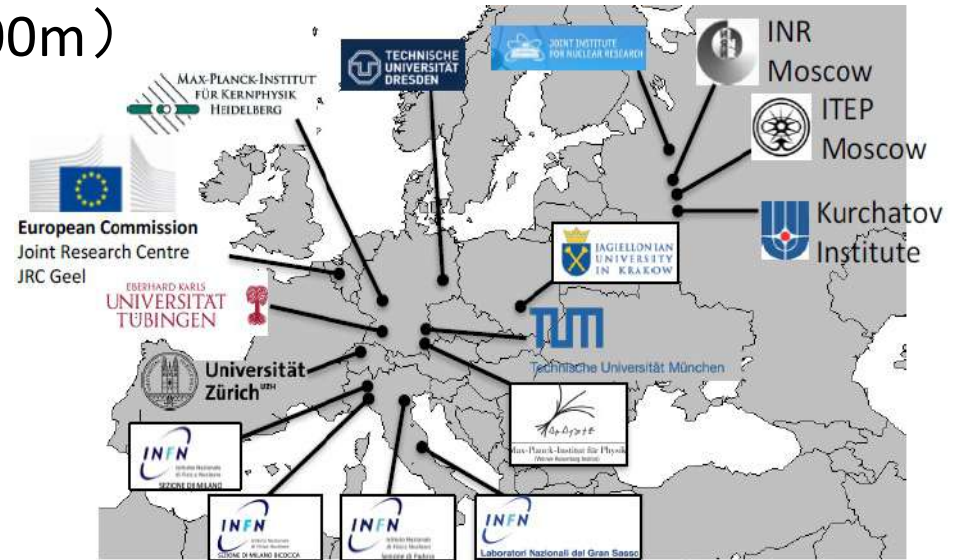
**ICPC**



# GERDA (GERmanium Detector Array)



- ✓ 意大利格兰萨索地下实验室 (1400m)
- ✓ 富集锗 + 液氦反符合
- ✓ 第一阶段目标:  
15 kg·yr,  $10^{-2}$  cts/(keV·kg·year)
- ✓ 第二阶段目标:  
40 kg·yr,  $10^{-3}$  cts/(keV·kg·year)



# GERDA Phase-II最新结果



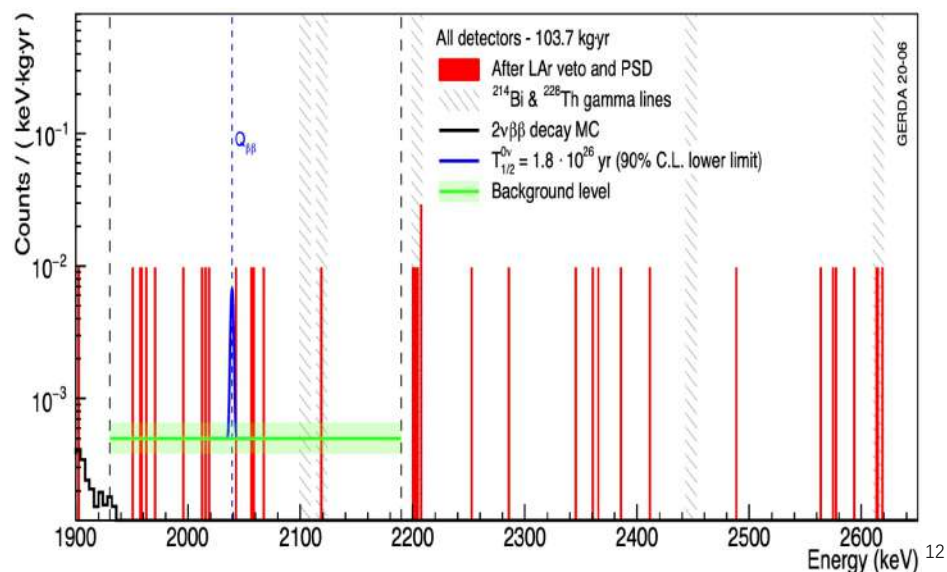
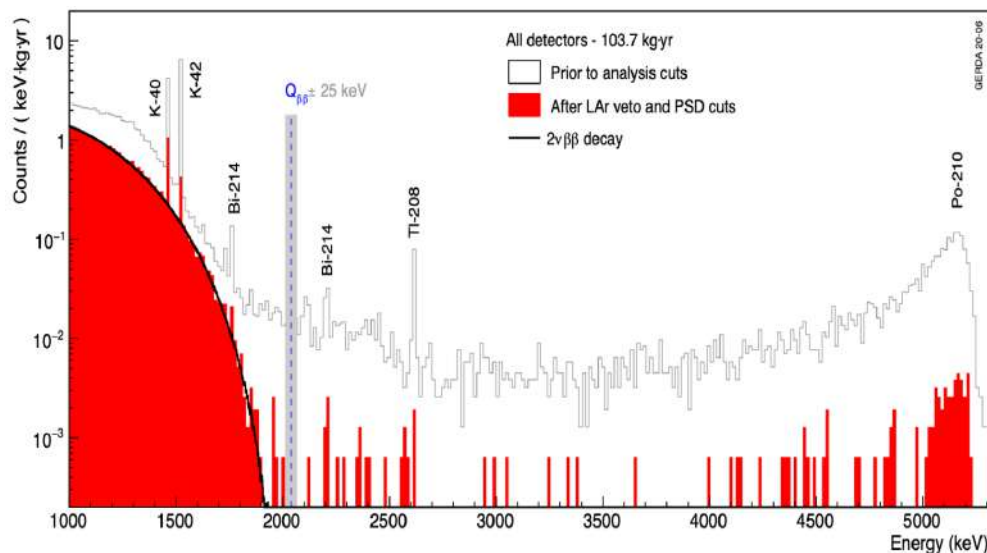
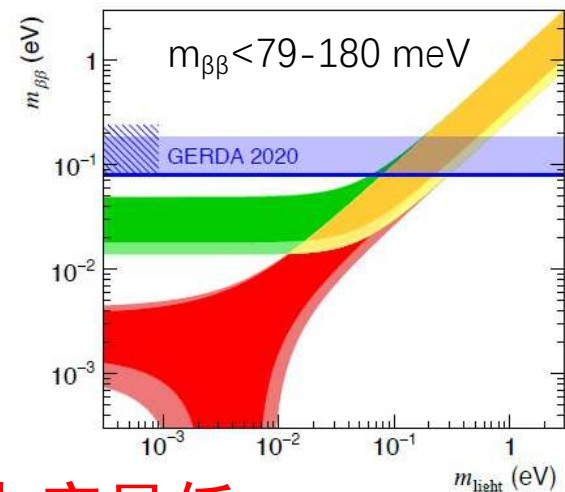
✓ 41个富集锗探测器，共44.2kg

- 6个同轴(14.6 kg)
- 30个宽能阈(20 kg)
- 5个反向同轴(9.6 kg)

✓ Phase I + Phase II累计曝光量127.2 kg·yr

✓ 本底超预期， $5.2 \times 10^{-4}$  cts/(keV·kg·year)，本底最低

✓ 未发现 $0\nu\beta\beta$ 信号， $T_{1/2} > 1.8 \times 10^{26}$  yr (90% C.L.)，半衰期最长

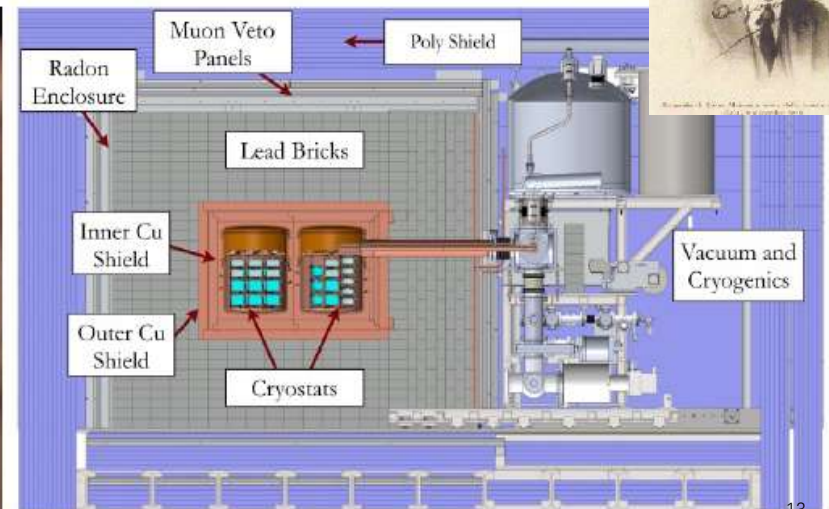
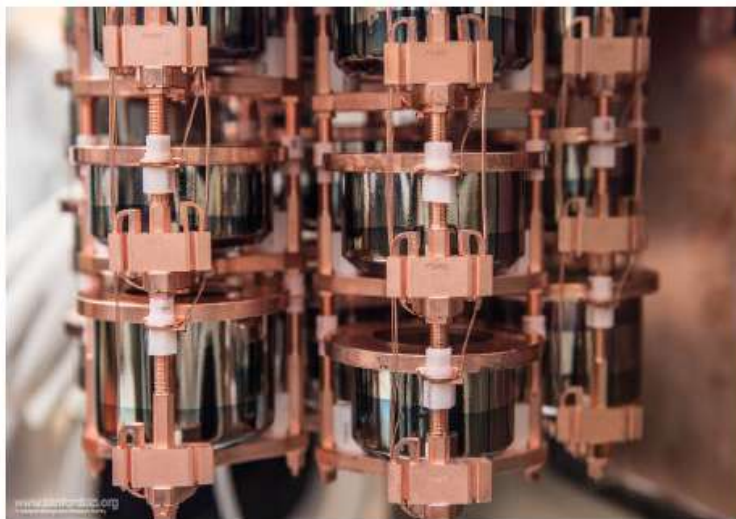




# MAJORANA DEMONSTRATOR



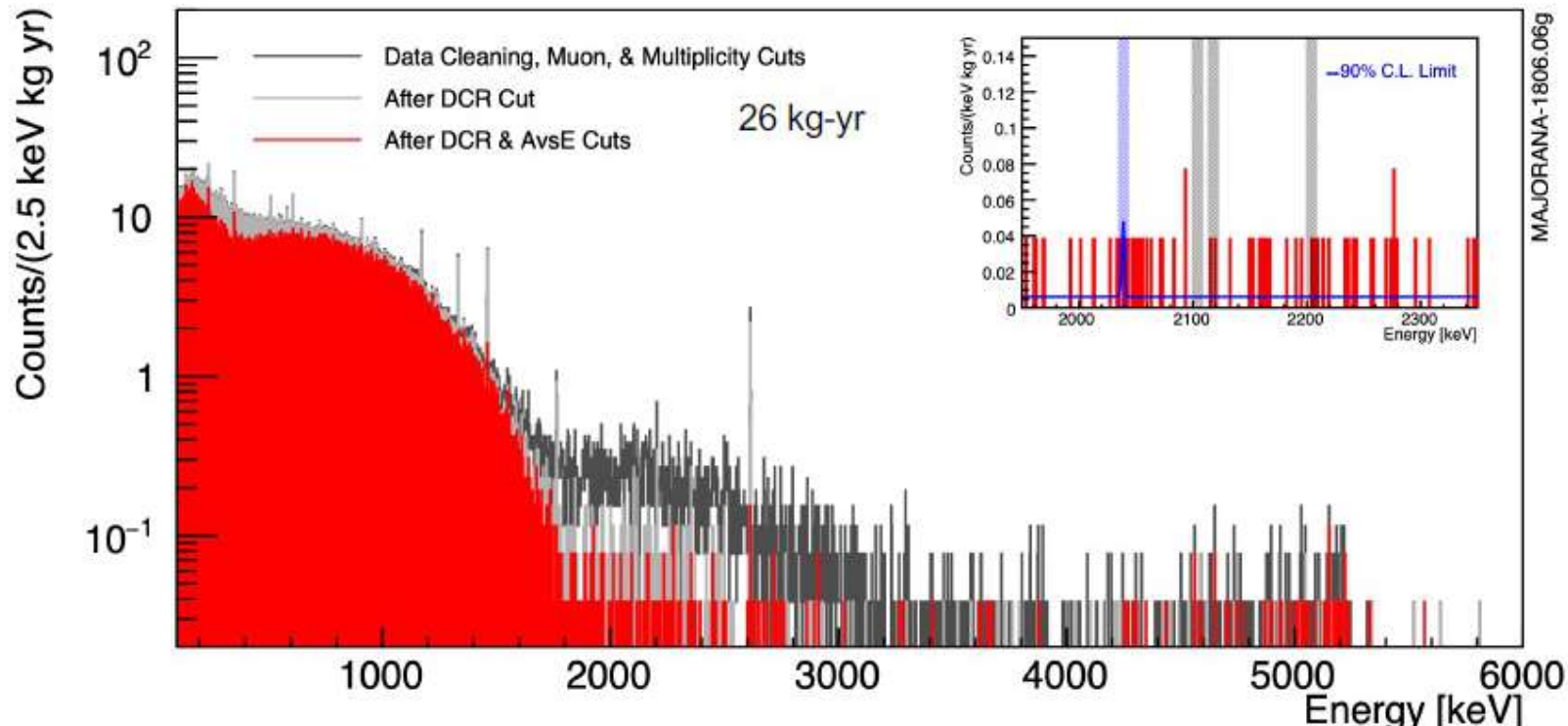
- ✓ 美国SURF地下实验室（1500m）
- ✓ 点电极高纯锗 + 真空低温恒温器  
29.7kg富集锗 + 14.4kg天然锗
- ✓ 目前最好的能量分辨率：  
2.5 keV FWHM@2039 keV
- ✓ 使用地下电解铜等超纯材料
- ✓ 开发了低噪声前端电子学



# Majorana最新结果



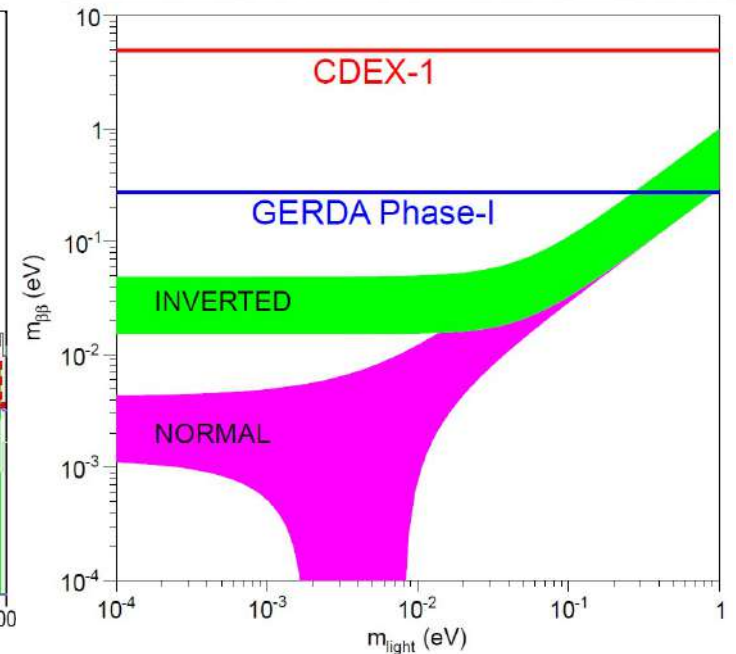
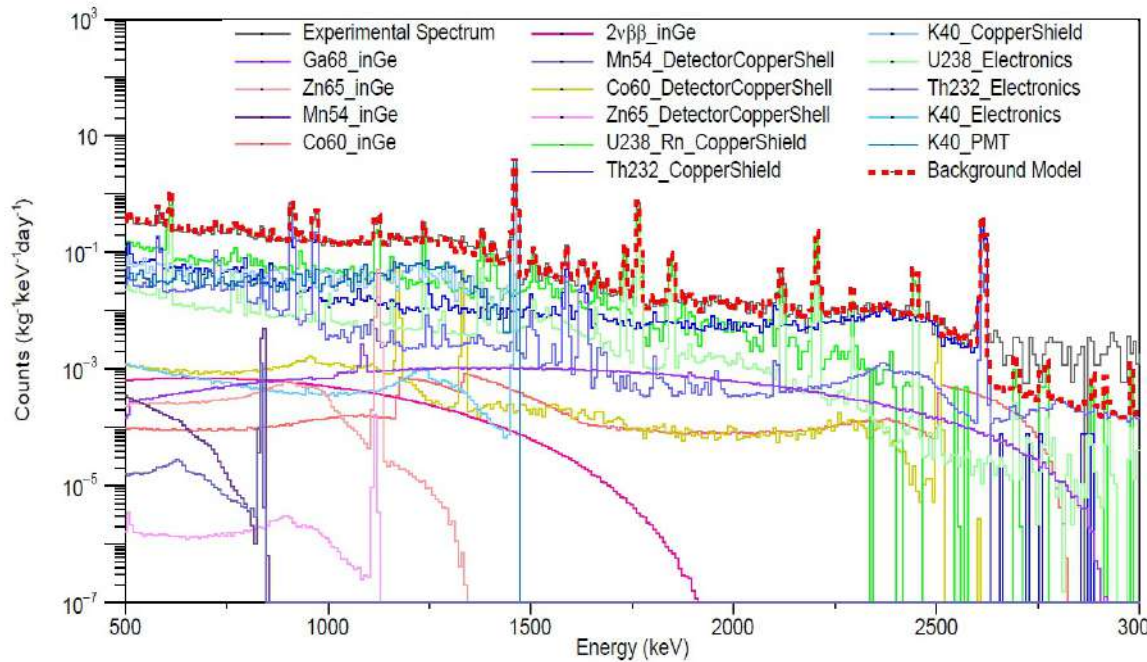
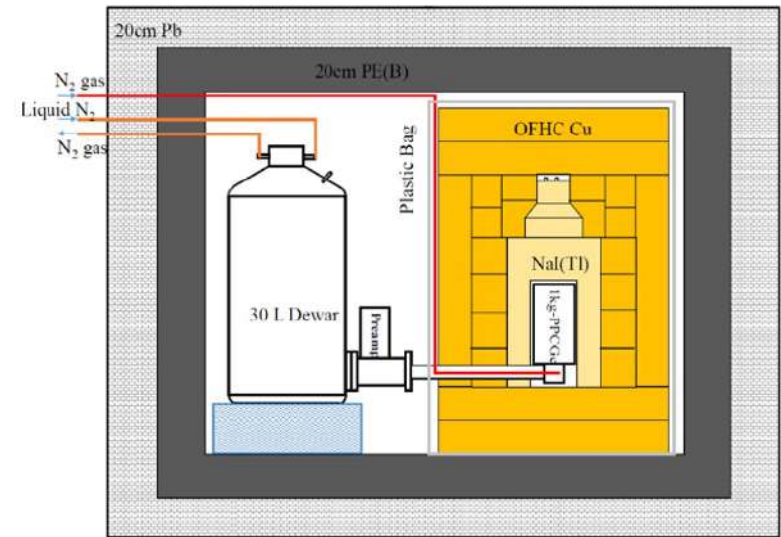
- ✓ 2019年8月发表26.0 kg·yr富集锗的分析结果
- ✓ 能量分辨率2.5 keV FWHM@2039 keV, **目前最佳**
- ✓ 本底水平 $4.7 \pm 0.8 \times 10^{-3}$  cts/(keV·kg·year)  $11.9 \pm 2.0$  cts/(FWHM t yr)
- ✓ 未发现 $0\nu\beta\beta$ 信号,  $T_{1/2} > 2.7 \times 10^{25}$  yr (90% C.L.)  $m_{\beta\beta} < 200-433$  meV



# CDEX



- ✓ 中国锦屏地下实验室 (2400m)
- ✓ CDEX-1单体1kg、低温恒温器、
- ✓ 本底控制 (~400 of GERDA)
- ✓  $T_{1/2}^{0\nu} > 6.43 \times 10^{22}$  yr, 90% C.L.





## Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless $\beta\beta$ Decay



- ✓ 全球52家单位的~250位研究人员
- ✓ 物理目标:  $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{28}$  yr,  $m_{\beta\beta} < 10-22$  meV
- ✓ 两个阶段: LEGEND-200 和 LEGEND-1000

### □ 第一阶段:

- 200kg
- 意大利LNGS
- 升级GERDA装置
- 2021年底开始运行
- 本底目标:  $1 \times 10^{-4}$  cts/(keV kg yr)



### □ 第二阶段:

- 1000kg
- 实验地点未定
- 技术方案未定
- 时间未定
- 本底目标:  $1 \times 10^{-5}$  cts/(keV kg yr)

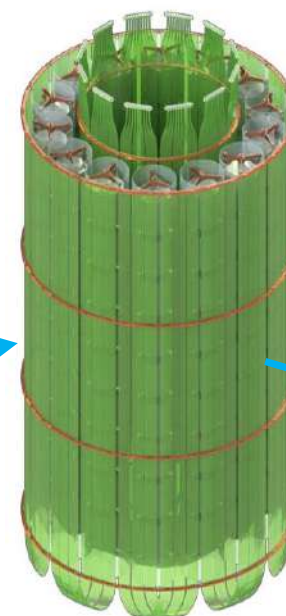
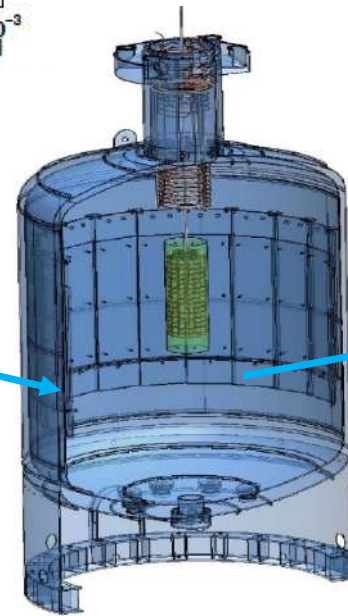
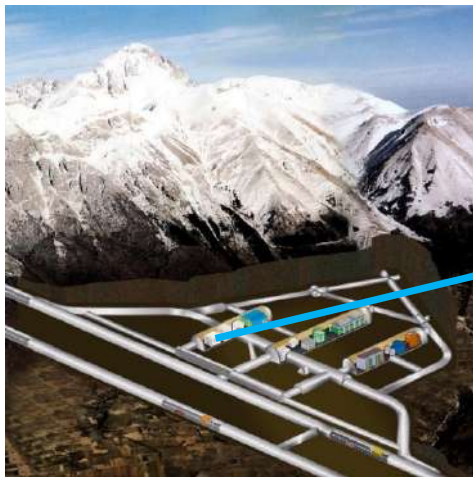
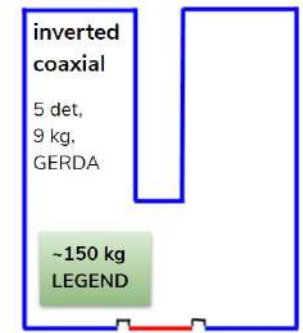
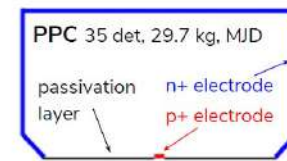
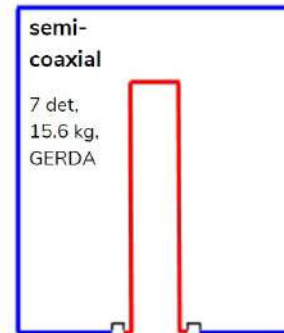
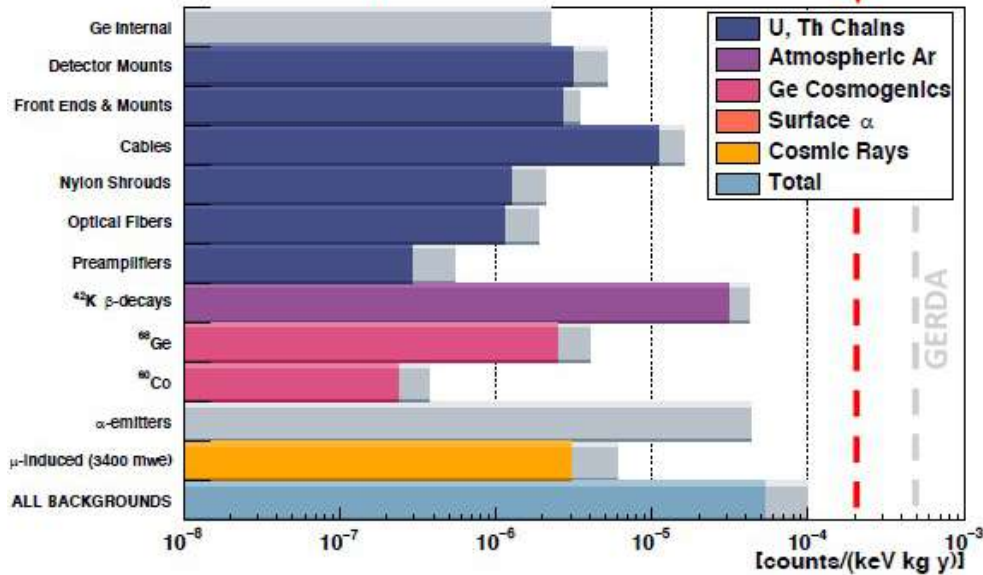




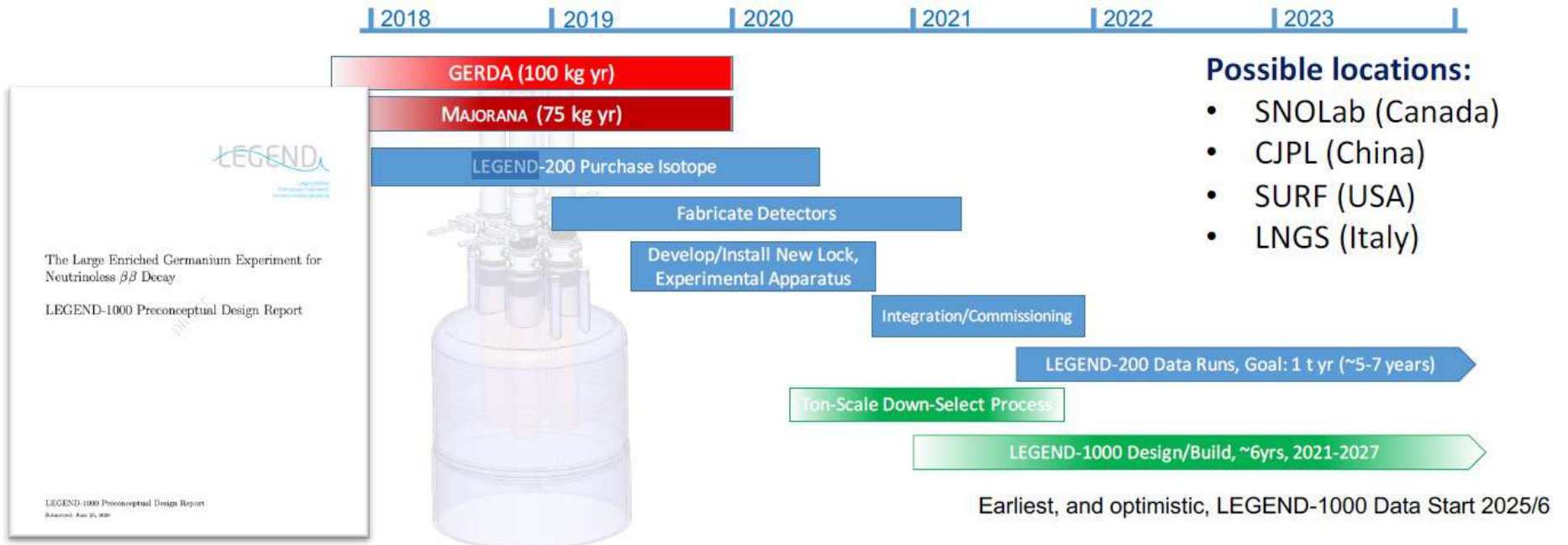
# LEGEND-200



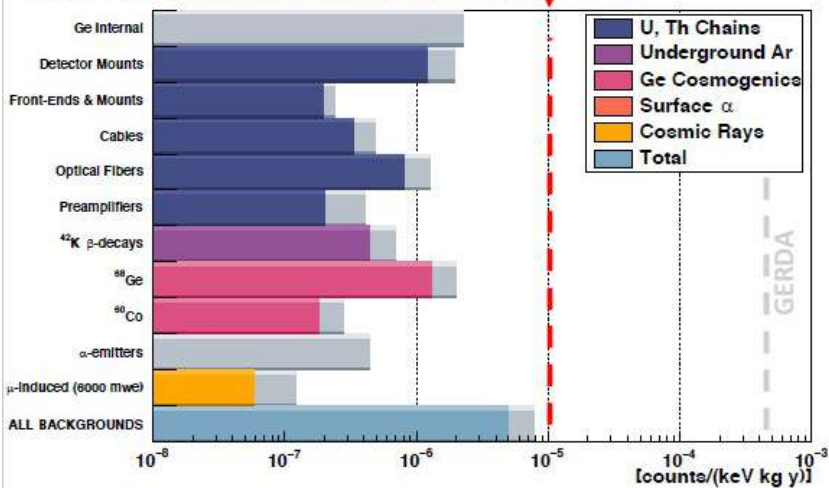
## LEGEND-200 background Goal



# LEGEND-1000



## LEGEND-1000 background Goal

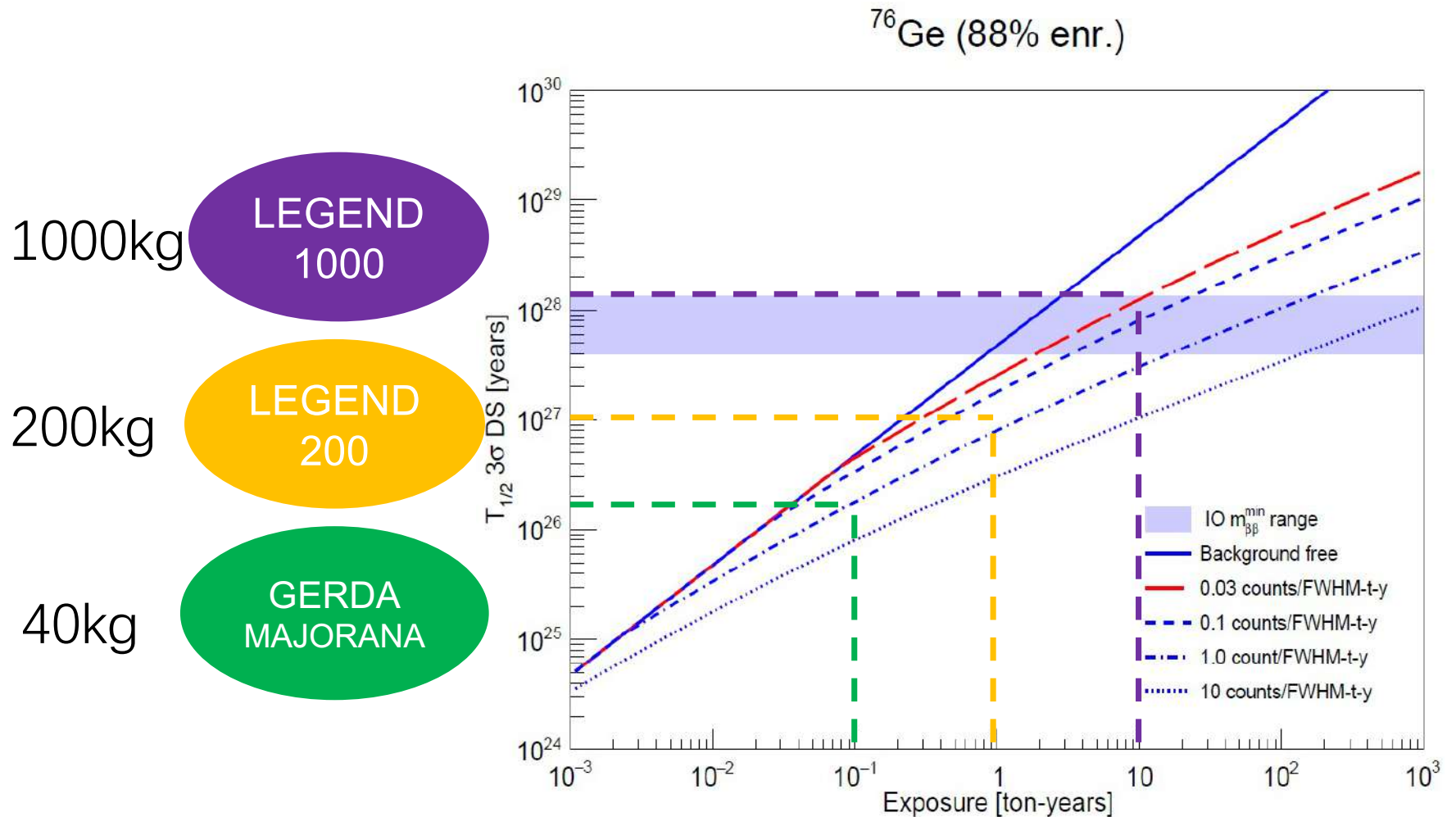


- 物理目标:  $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{28}$  yr
- 本底目标:  $1 \times 10^{-5}$  cts/(keV·kg·yr)
- 需要大幅降低<sup>42</sup>K本底、宇宙线本底、探测器表面事例本底等
- 实验地点/技术方案/时间线待定

# LEGEND



- ✓ 目前是美国为主推动，向US DOE申请经费；
- ✓ 2018年开始，DownSelection一直延期，至今没有明确方案。



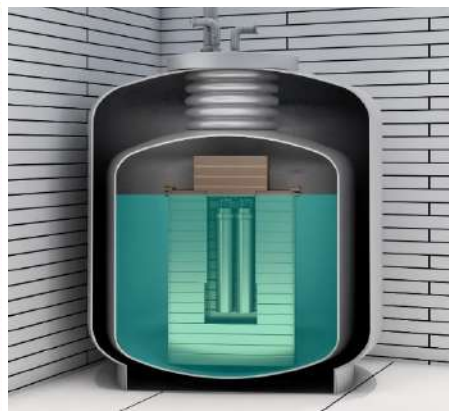
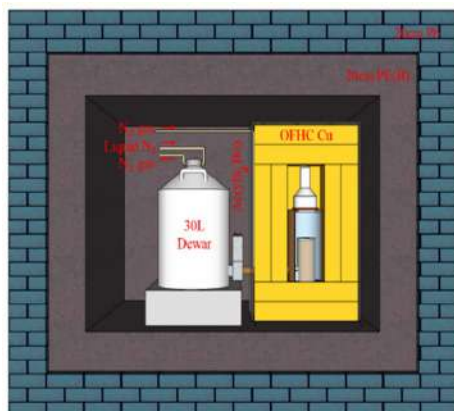
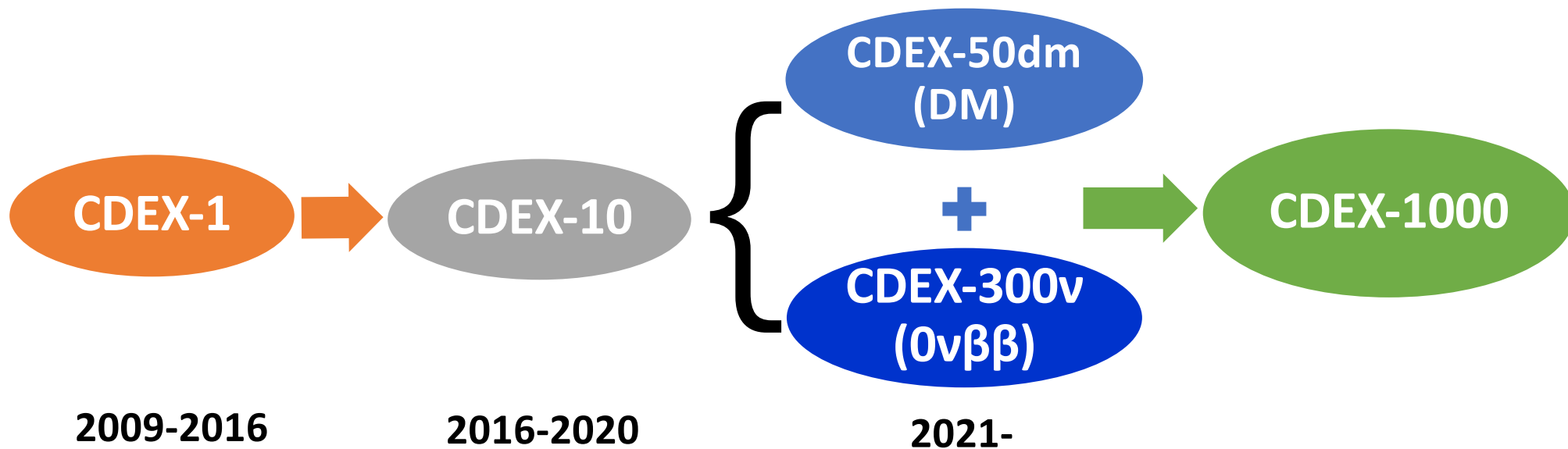


# CDEX “盘古” 合作组





# CDEX Roadmap



CJPL-I

CJPL-II

# CDEX物理成果

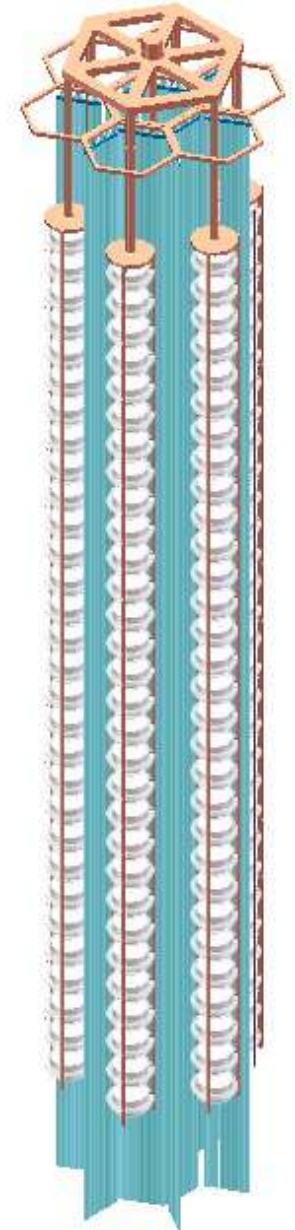
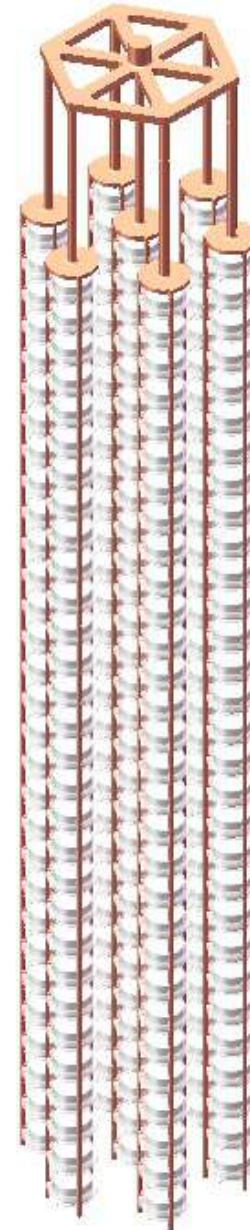
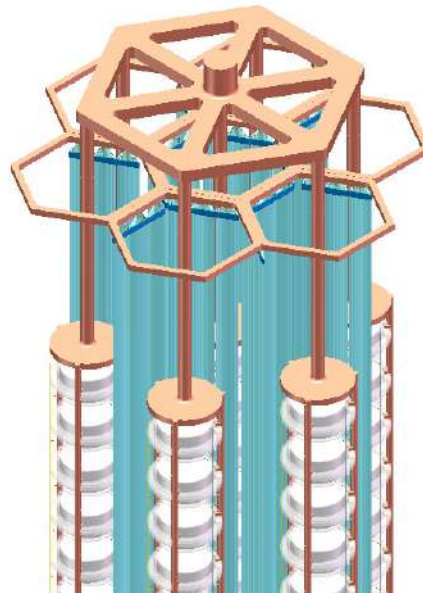
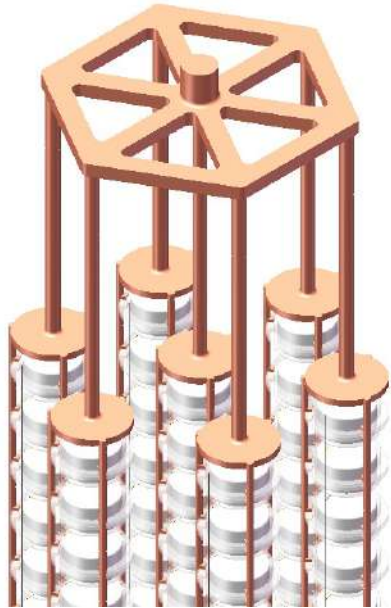


Physics Channels	Detectors	Analysis Threshold (eV)	Exposure (kg×day)	Publications
Chi-N SI	CDEX-1A	400	14.6	PRD 88, 052004, 2013
Chi-N SI	CDEX-20g	177	0.784	PRD 90, 032003, 2014
Chi-N SI	CDEX-1A	475	53.9	PRD 90, 091701, 2014
Chi-N SI/SD	CDEX-1A	475	335.6	PRD 93, 092003, 2016
Axion	CDEX-1A	475	335.6	PRD 95, 052006, 2017
$0\nu\beta\beta$	CDEX-1A	—	304.0	Sci. China 60, 071011, 2017
Chi-N SI/SD	CDEX-1B	160	737.1	CPC 42, 023002, 2018
Chi-N SI/SD	CDEX-10	160	102.8	PRL 120, 241301, 2018
Migdal Effect	CDEX-1B	160	737.1	PRL 123, 161301, 2019
Chi-N AM	CDEX-1B	250	1107.5	PRL 123, 221301, 2019
Axion	CDEX-1B	160	737.1	PRD 101, 052003, 2020
Dark Photon	CDEX-10	160	205.4	PRL 124, 111301, 2020
Chi-N EFT	CDEX-10	160	205.4	arXiv:2007.15555

# CDEX-300v



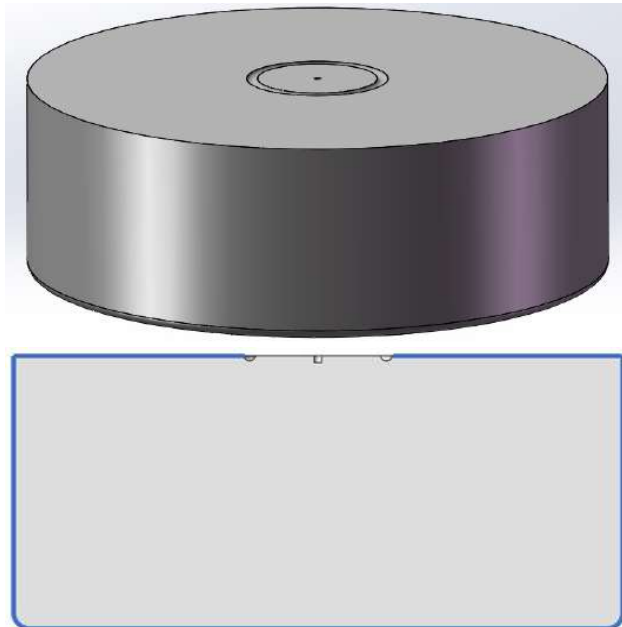
- 7串，每串~30个高纯锗晶体
- 锗探测器总质量: ~300kg
- 探测器类型:
  - ✓ BEGe (Baseline)
  - ✓ ICPC (optional)



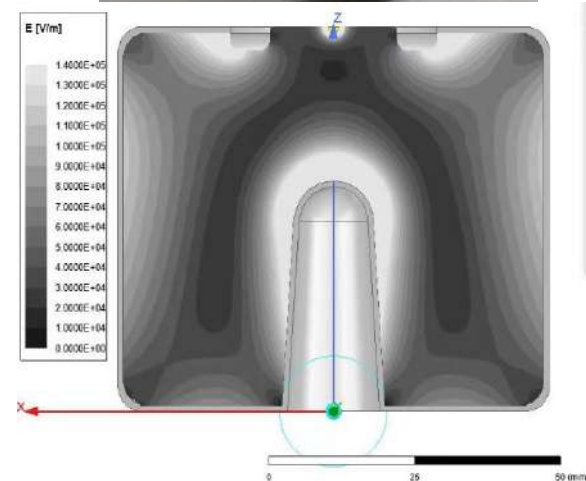
# CDEX-300v Detectors



- BEGe (Baseline)
  - Mass: 1-1.2 kg;
  - Size:  $\phi 80\text{mm} \times 40\text{mm}$ ;
  - Dead layer: 0.6mm;
  - $E_r$ :  $<0.15\%$ @2MeV;
  - BI:  $1 \times 10^{-4}$  cts/(keV·kg·yr)**
  - $T_{1/2}$ :  $>10^{27}$  yr



- ICPC (optional)
  - Mass:  $\sim 2$  kg;
  - Size:  $\phi 80\text{mm} \times 80\text{mm}$ ;
  - Dead layer: 0.6mm;





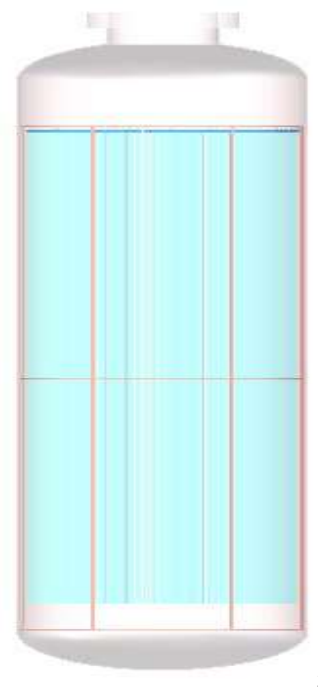
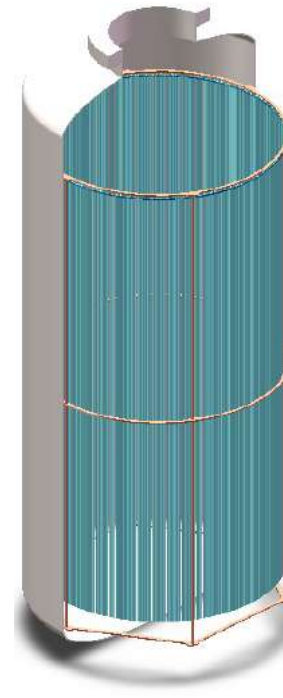
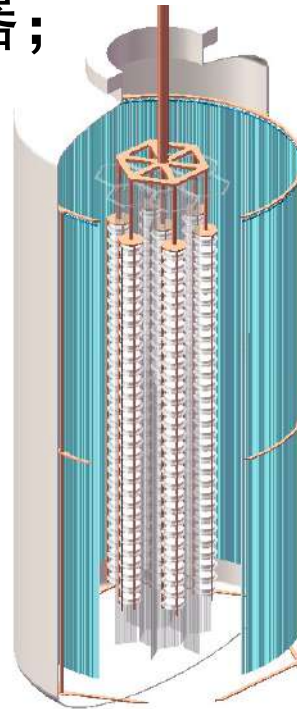
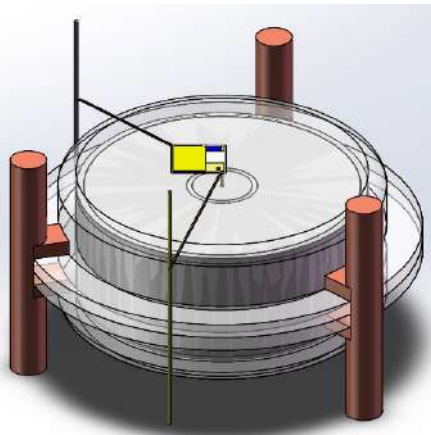
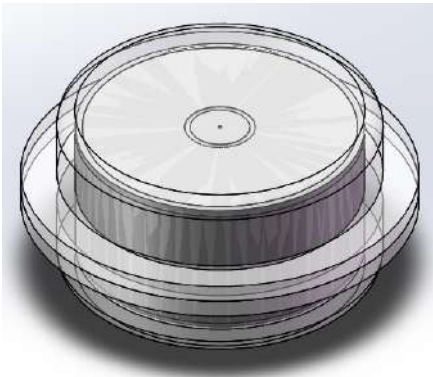
# CDEX-300v Detectors



**Baseline:** BEGe + LAr (反符合)

**R&D:**

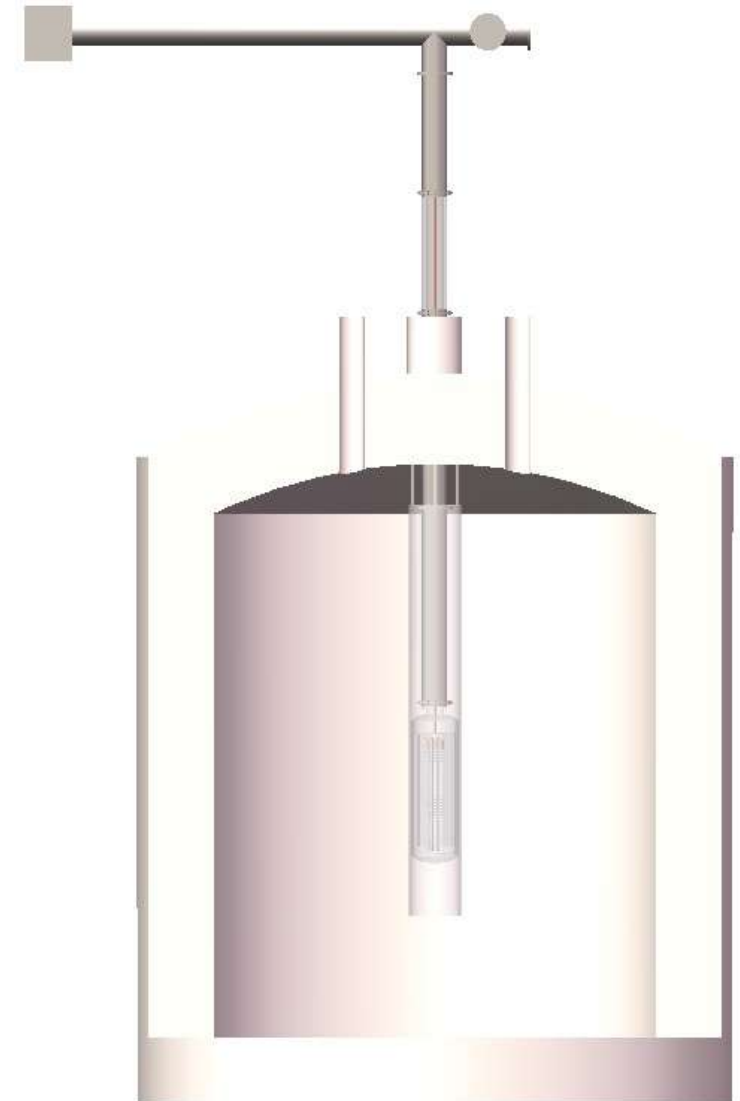
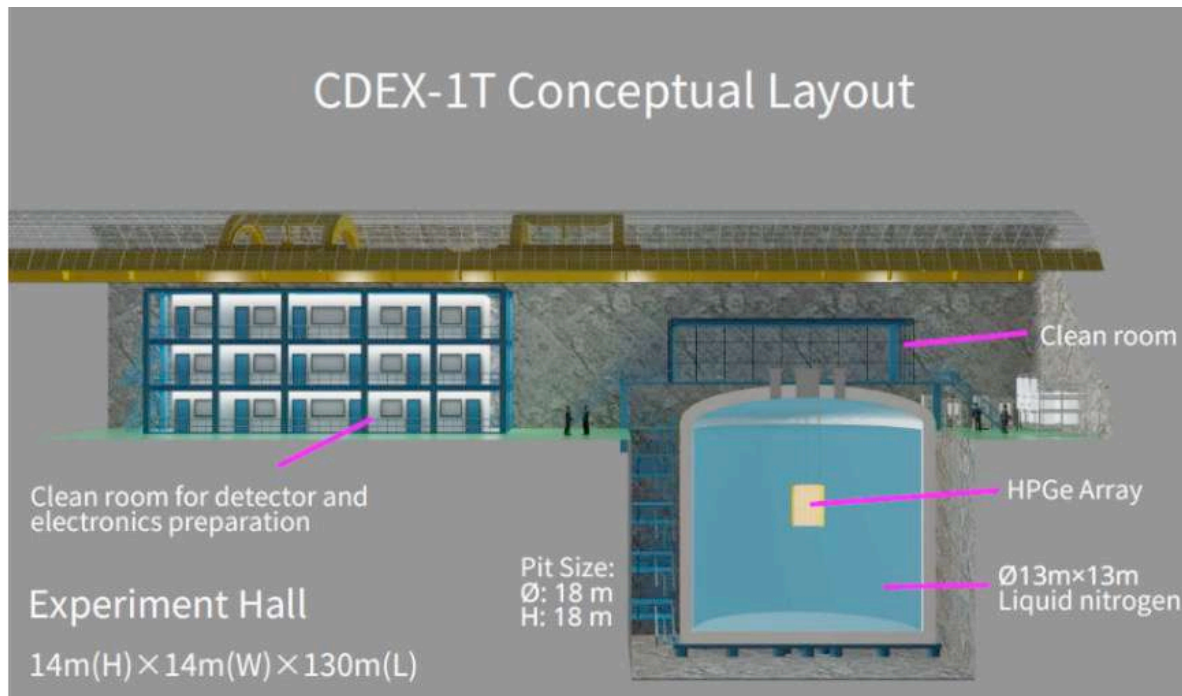
- 探测器密封在亚克力壳中；隔离锗晶体与外部LAr；
- 电子学安装在亚克力壳外表面；
- 液氩反符合，光读出采用SiPM + 移波光纤
- 使用高纯钛制作液氩容器；



# CDEX-300v



- 液氮罐顶部安装洁净间，用于高纯锗探测器及光纤安装；
- 液氮冷却液氙，同时屏蔽外部本底；
- 2022年初开始富集锗探测器在液氮/液氙中的性能和稳定运行测试；





# 本底来源

- CDEX-300v目标  $1 \times 10^{-4}$  cts/(keV kg yr) @2039keV
- 为达到目标本底，需分析各种本底来源、进行优化控制

	本底类别	主要来源	降低途径	备注
1、环境本底	宇宙线缪子、环境伽马和中子	环境	深地、实验室材料控制	
2、屏蔽材料本底	屏蔽材料的宇生、原生放射核素	屏蔽材料	屏蔽设计、材料优化	
3、探测器自身本底	高能 $\gamma$ 射线在低能区的连续Compton平台	电子学部件、电缆、结构材料等	选用更纯的电子学部件、电缆，采用自制超高纯电解铜	
	宇生非锗核本底贡献	宇生非锗同位素特征X射线及 $\gamma$ 射线的级联本底 Tritium的连续本底 (18keV以下)	控制地面晶体生长和探测器研制时间	若掌握晶体生长技术，可在地下实验室进行晶体生长
	宇生锗核本底贡献	Ge-68及其子核Ga-68的K、L、M特征X射线及连续区域	同位素富集 (主要为减少Ge-70)	

# CDEX-300v本底优化控制



## □ CDEX-300v本底控制方案（初步）

- ① 采用6.5m的液氮屏蔽，且液氮中 $^{222}\text{Rn}$ 需要纯化（ $\mu\text{Bq/kg}$ ）；
- ② 采用液氩做反符合，液氩需要纯化或采用地下氩；
- ③ 探测器内铜构件需要采用地下生产电解铜（ $\mu\text{Bq/kg}$ ）；
- ④ 探测器非铜构件材料放射性活度需要优化（ $\sim 0.1\text{mBq/kg}$ ）；
- ⑤ 采用富集锗制作探测器，希望未来在地下生产锗晶体；

要求具备 $\mu\text{Bq/kg}$ 放射性测量能力

## □ CDEX未来实验中的关键技术

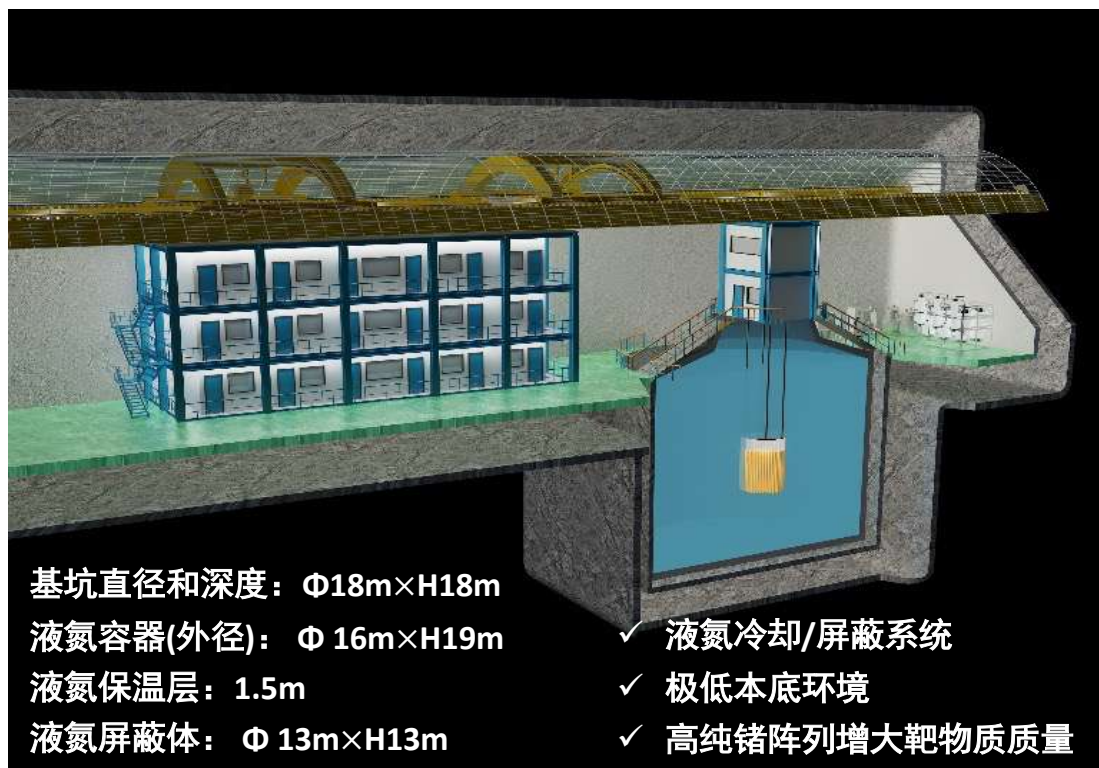
- ① 大型液氮低温屏蔽系统
- ② 地下超低本底电解铜
- ③ 低本底低噪声前端电子学
- ④ 超低本底高纯锗探测器
- ⑤ 宇生放射性控制方案（富集锗+屏蔽运输）



# 大型液氮低温屏蔽系统



- 采用**6.5m、纯化的液氮** ( $\mu\text{Bq/kg } ^{222}\text{Rn}$ ) 屏蔽系统, 可将探测器环境本底、屏蔽体材料自身本底降低到  $\sim 2 \times 10^{-6} \text{ cts}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{day}) @2039\text{keV}$ ;



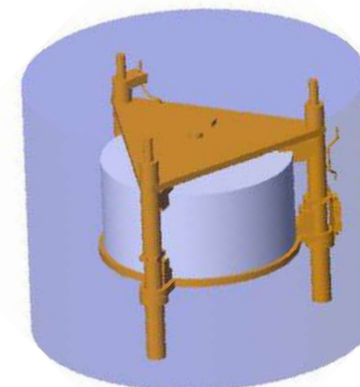
屏蔽系统本底构成 (反符合及PSD前)

本底来源	ROI本底 ( $\text{cpkkd}@2039\text{keV}$ )
液氮外部 $\gamma$	$< 10^{-7}$
液氮外部中子	$< 10^{-8}$
液氮/液氩中 $^{222}\text{Rn}$ ( $\sim 0.1\text{mBq/kg}$ )	$\sim 2 \times 10^{-4}$ (未纯化)
液氮/液氩中 $^{222}\text{Rn}$ ( $\sim \mu\text{Bq/kg}$ )	$\sim 2 \times 10^{-6}$ (纯化)
天然氩中 $^{42}\text{Ar}$ ( $\sim 90 \mu\text{Bq/kg}$ )	$\sim 1 \times 10^{-5}$
地下氩中 $^{42}\text{Ar}$ ( $< 1/1400 \text{ times}$ )	$< 10^{-8}$

# 地下超低本底电解铜



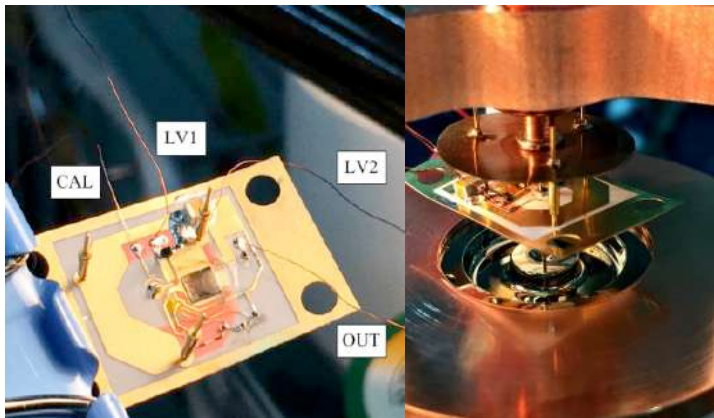
- 探测器核心构件分为铜材质和非铜材，铜材质居多；
- 探测器内铜构件需要采用地下生产电解铜 ( $\mu\text{Bq}/\text{kg}$ ) ；
- 目标: U/Th含量 $\sim$  O( $0.1\mu\text{Bq}/\text{kg}$ )；
- 千级洁净棚@CJPL-I



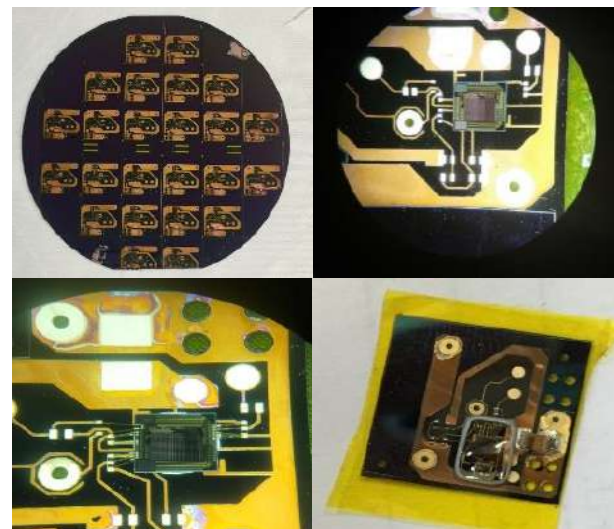
# 低本底低噪声前端电子学研究



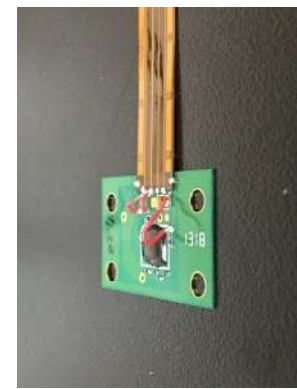
- 最靠近高纯锗晶体的材料→**低本底（高纯度、低质量）**
- ✓ 基于CMOS ASIC的低温低噪声前放研制
- ✓ 低本底电路基板：熔炉石英和硅基板
- ✓ 低本底线缆：PTFE（聚四氟乙烯）柔性电缆



ASIC前放



硅基板



PTFE柔性电缆

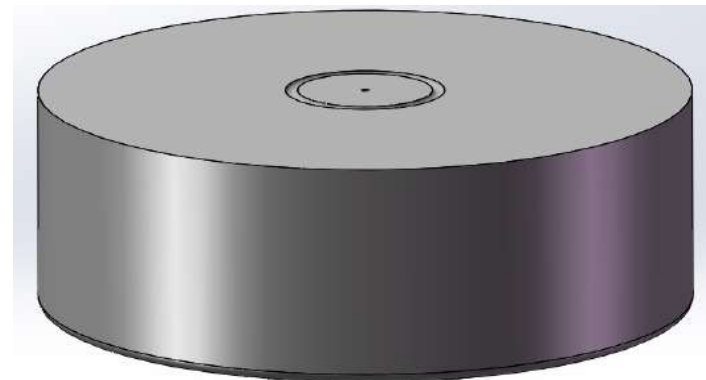
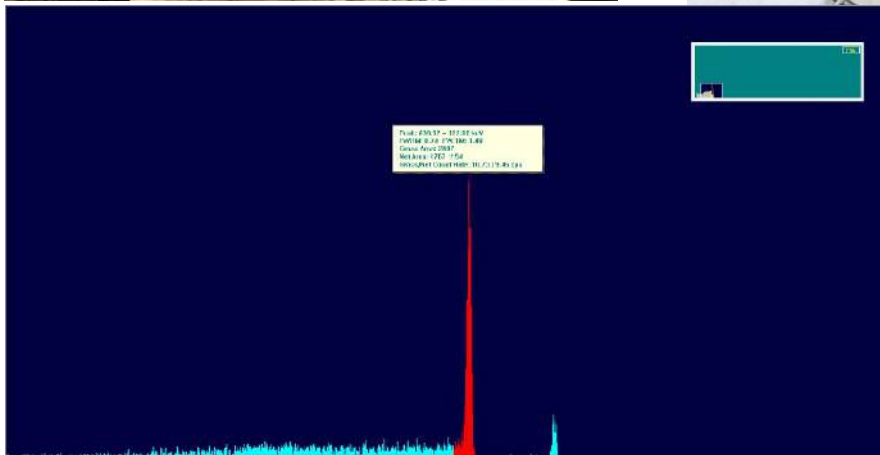
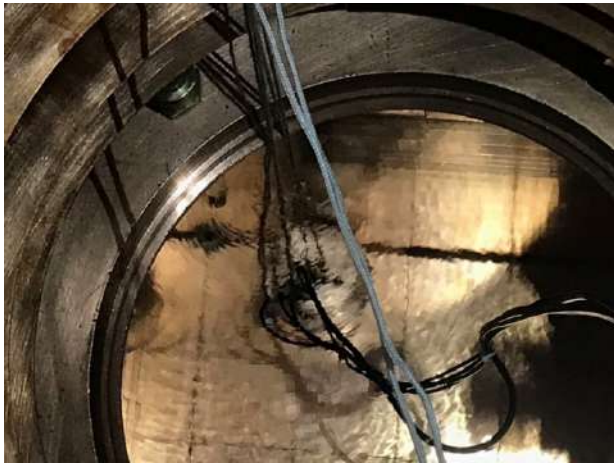




# CDEX HPGe探测技术研发



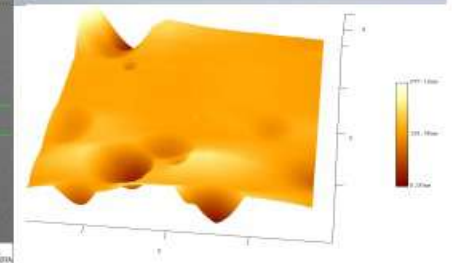
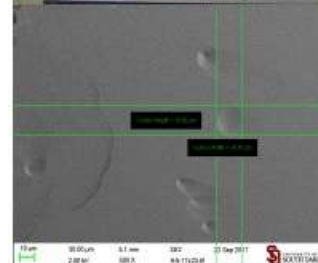
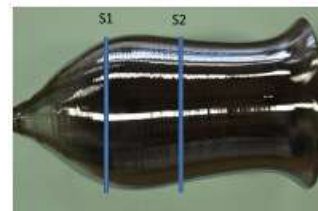
- 开展BEGe和ICPC探测器自主研制，取得成功；
- 开展高纯锗探测器裸泡测试，长期性能稳定；



# CDEX HPGe探测技术研发



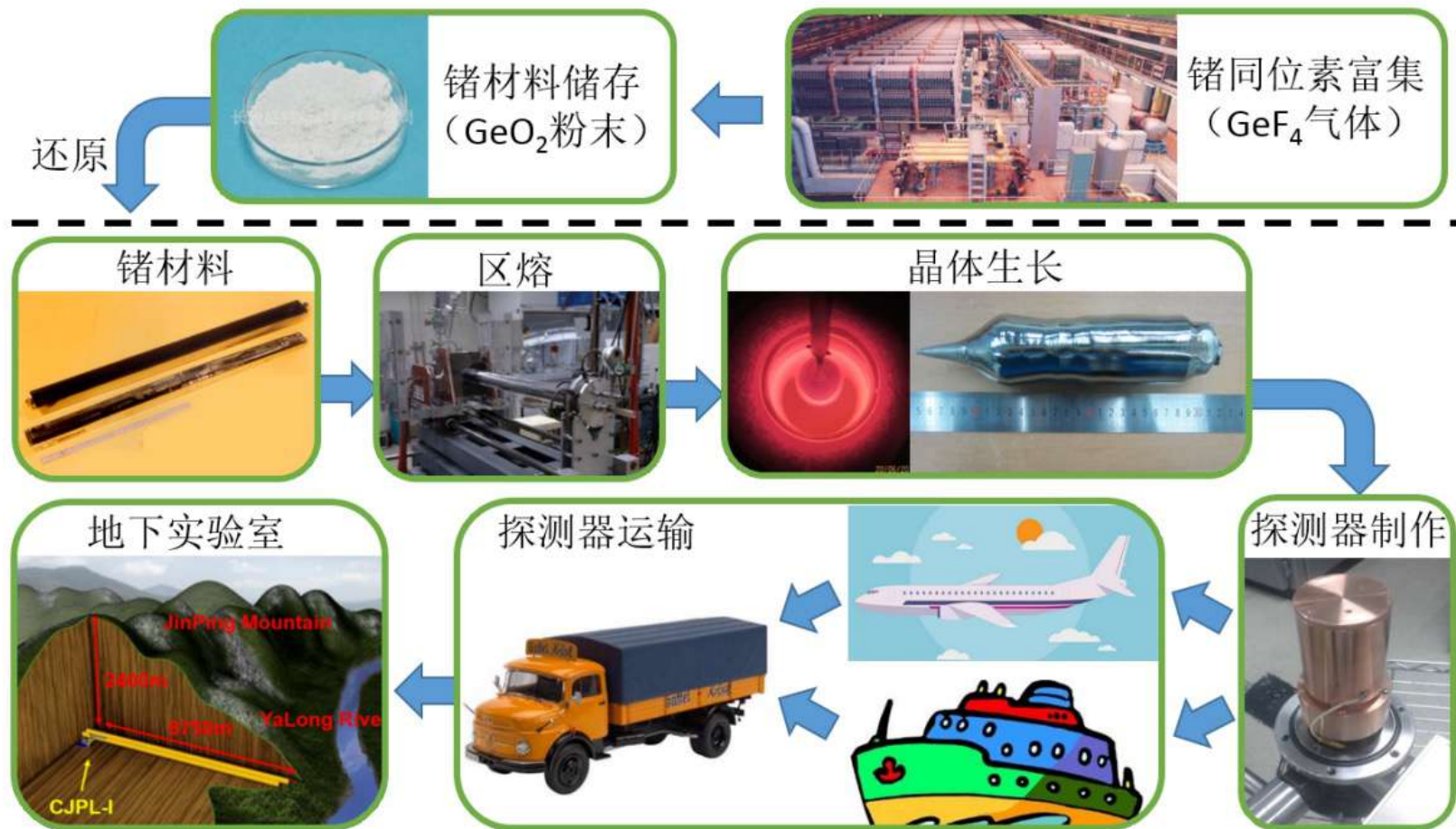
- 开展了长期的锗晶体生长工艺研究，取得进展；
- 未来可以地下生长锗晶体，大大压低宇生本底，提升 $0\nu\beta\beta$ 实验灵敏度。



# CDEX 富集锗材料和探测器制备



- 开展富集锗材料购置和富集锗探测器研制；
- 首批探测器将于2021年底到达锦屏地下实验室；





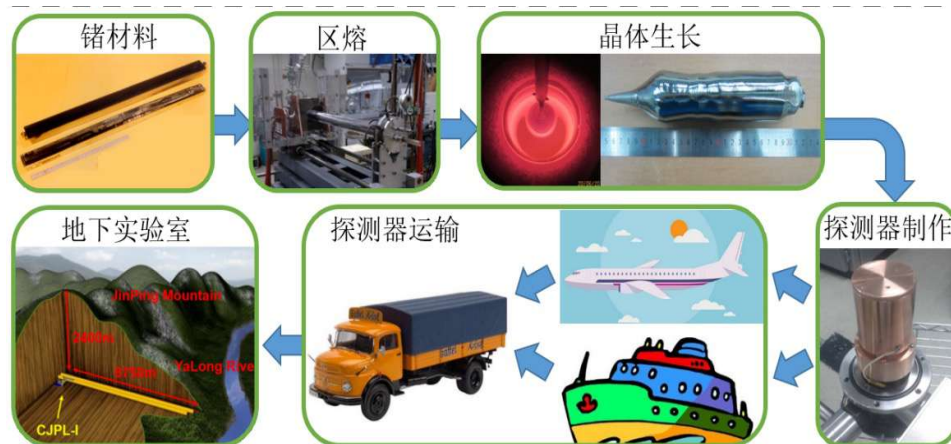
# 锗晶体内宇生放射性研究



## 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。

## 锗材料宇宙射线照射场景



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

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

# 高纯锗探测器运输专用屏蔽



- **避免探测器的高空运输：** 每一步运输都使用**17吨的钢屏蔽体**；
  - ✓ 屏蔽体顶面厚度700mm，侧面厚度400mm；
  - ✓ 针对整个运输过程模拟，预计可将宇生放射性**降低至少25倍**；



放射性核素	主要贡献能区	运输屏蔽系数
$^{68}\text{Ge}$	$0\nu\beta\beta$	27.1
$^{63}\text{Ni}$	DM	40.1
$^{60}\text{Co}$	DM/ $0\nu\beta\beta$	47.0
$^3\text{H}$	DM	46.6

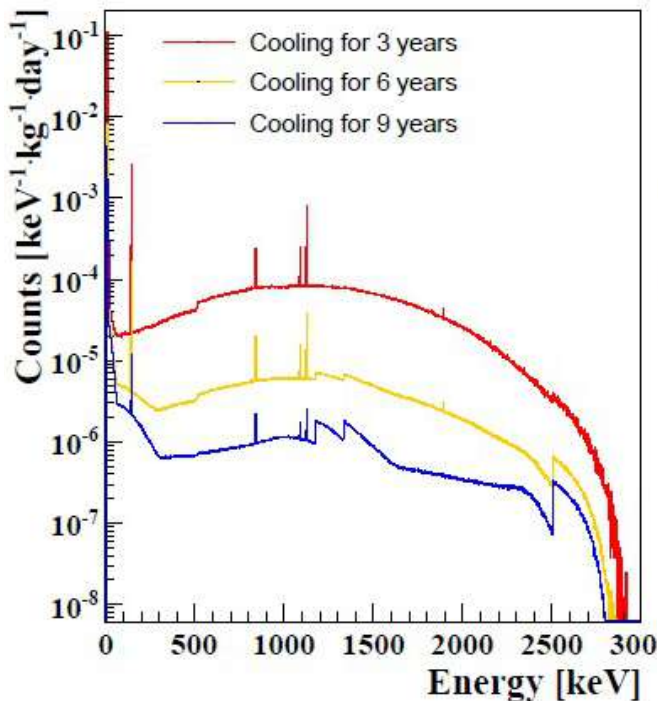
# 无中微子双 $\beta$ 衰变探测



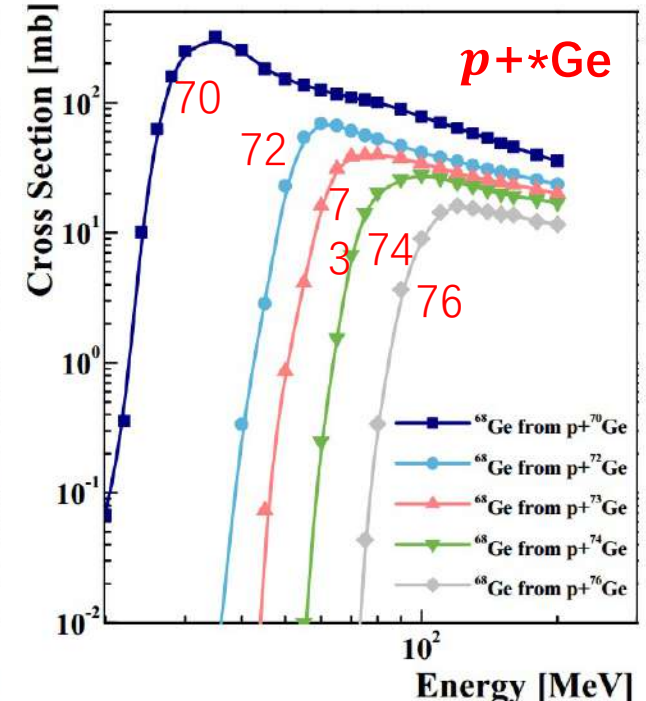
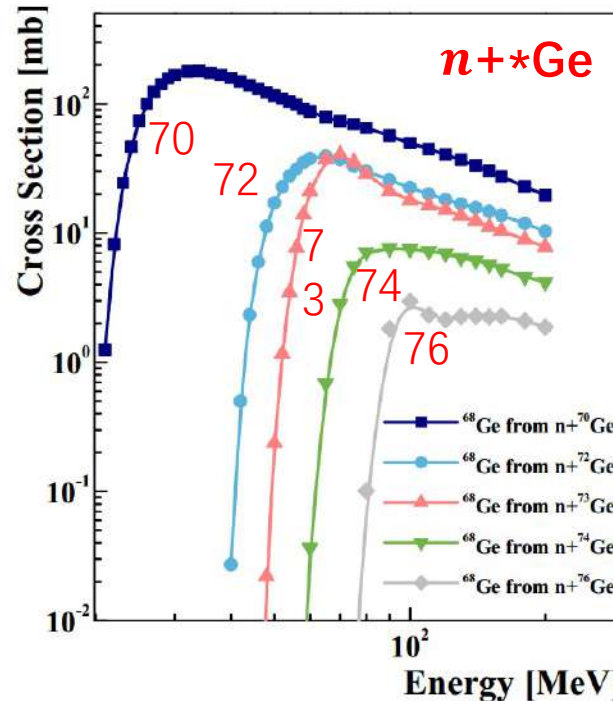
## 富集 $^{76}\text{Ge}$

- ✓ 主要本底来自于 $^{60}\text{Co}$  ( $\beta^-$ ),  $^{68}\text{Ga}$  (EC or  $\beta^+$ ), 可通过PSD甄别进一步降低;
- ✓  $^{68}\text{Ge}$ 降低方法: 1) 增加冷却时间 2) 减少产生率 ( $^{76}\text{Ge}$ 富集+运输屏蔽)

改变冷却时间



$^{68}\text{Ge}$ 的产生截面





# 无中微子双 $\beta$ 衰变探测



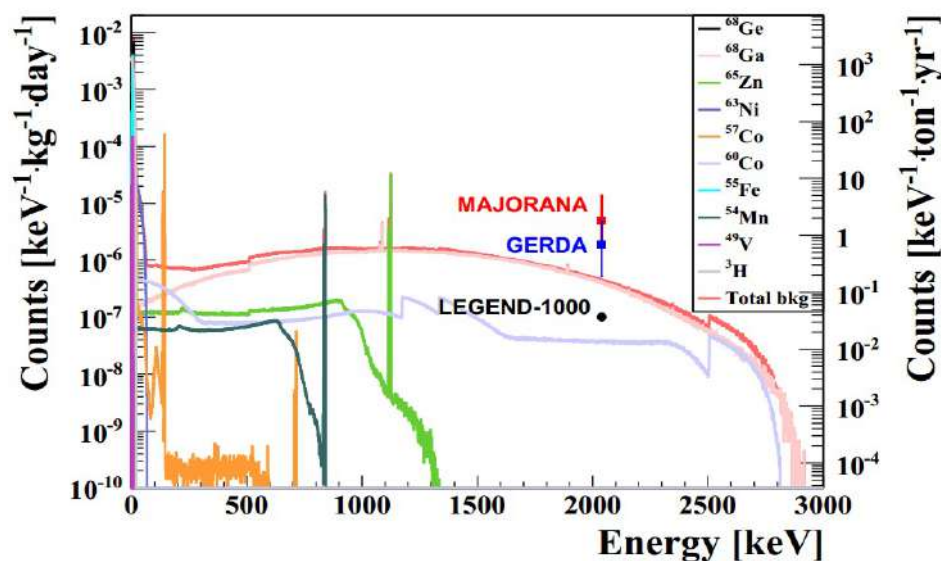
## ■ 富集 $^{76}\text{Ge}$

- ✓ 主要本底来自于 $^{60}\text{Co}$  ( $\beta^-$ ),  $^{68}\text{Ga}$  (EC or  $\beta^+$ ), 可通过PSD甄别进一步降低;
- ✓  $^{68}\text{Ge}$ 降低方法: 1) 增加冷却时间 2) 减少产生率 ( $^{76}\text{Ge}$ 富集+运输屏蔽)

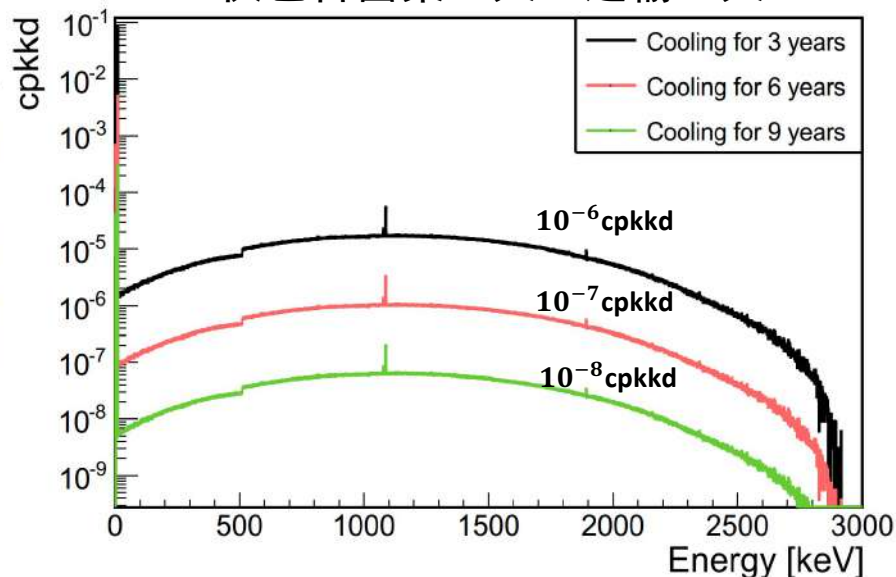
## ■ 如果未来能够在地下实验室进行晶体生长及探测器制作

- ✓ 除 $^{68}\text{Ge}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 外, 其他长寿命宇生放射性核素均降低到可以忽略的水平。

地面生长晶体及探测器制作  
(地下冷却6年)



地下生长晶体及探测器制作  
(仅包含富集40天、运输45天)



# 未来展望-暗物质探测



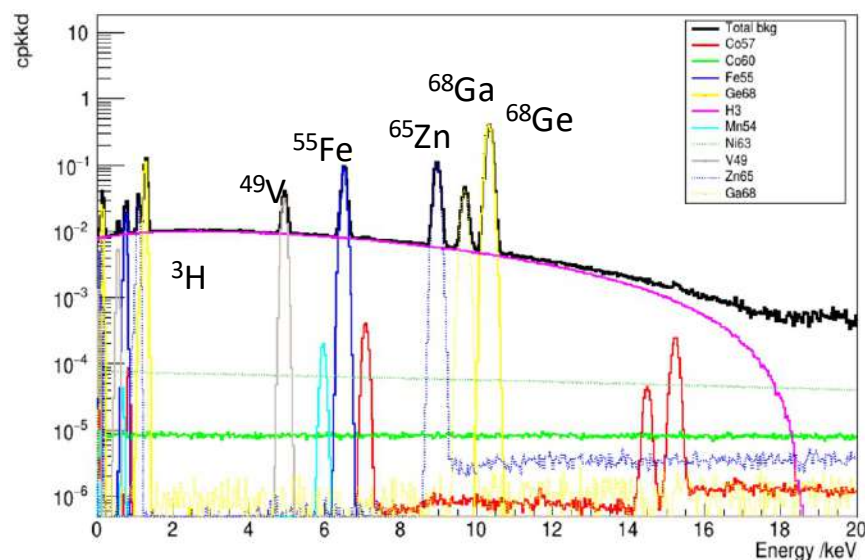
## ■ 在暗物质探测关心的低能区 (< 2 keV) :

- ✓ 富集锗并不能解决其他宇生放射性核素尤其是 $^3\text{H}$ 的问题;
- ✓  $^{68}\text{Ge}$ 特征峰可通过拟合扣掉, 但 $^3\text{H}$ 连续能谱无法扣除;

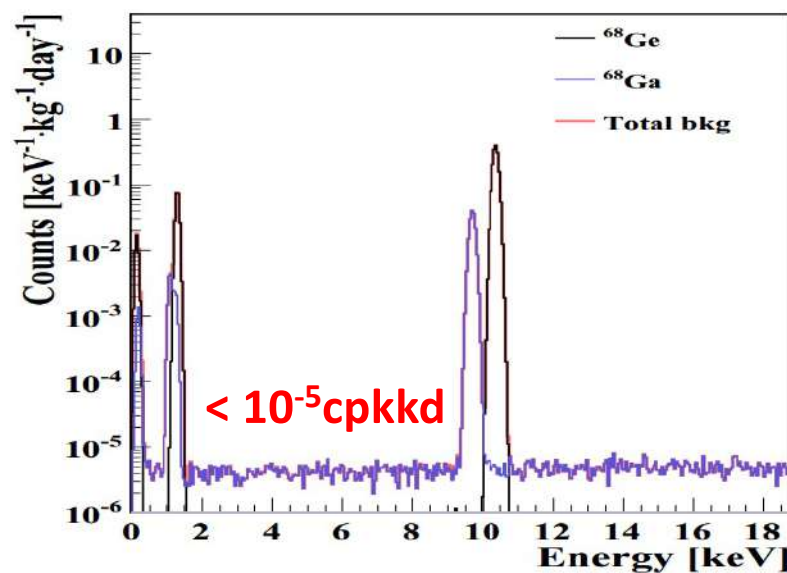
## ■ 如果未来能够在地下实验室进行晶体生长及探测器制作

- ✓ 除 $^{68}\text{Ge}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 外, 包括 $^3\text{H}$ 在内的其他长寿命宇生放射性核素均降低到可以忽略的水平。

地面生长晶体和探测器制作



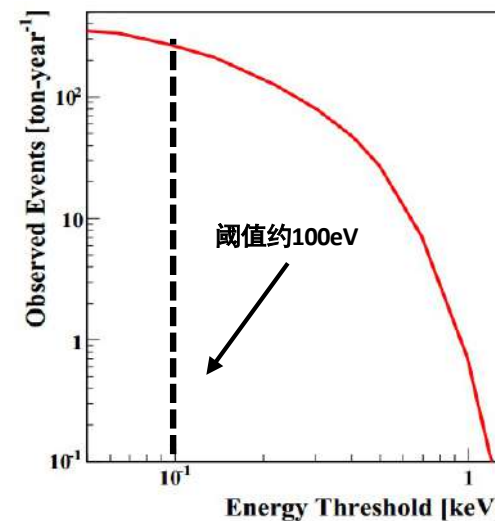
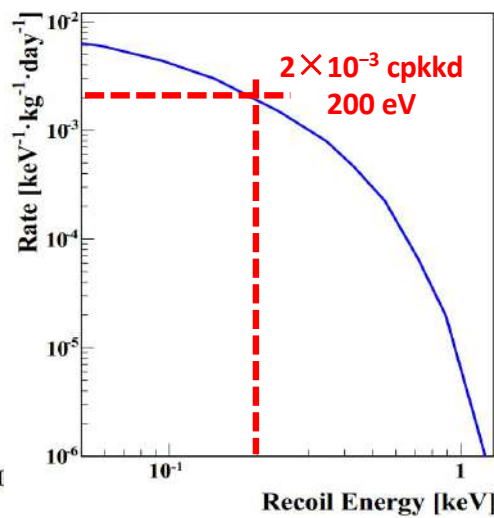
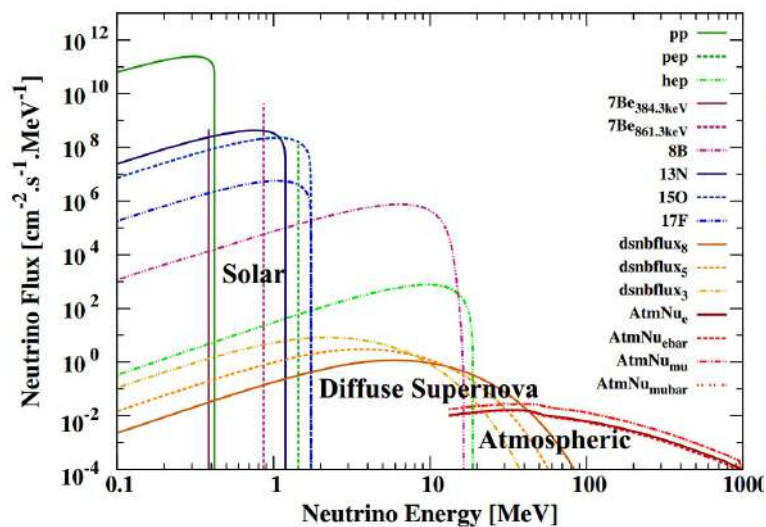
地下生长晶体和探测器制作



# 未来展望-太阳中微子探测



- 对于低阈值高纯锗探测器来说，随着本底降低，最有可能先探测到<sup>8</sup>B太阳中微子；
- 当本底水平达到 $2 \times 10^{-3}$  cpkkd@1keV，阈值达到200 eV时，将不可避免的触碰到中微子台阶；
- 理想情况下，每吨靶物质每年可以探测到约350个太阳中微子（其中<sup>8</sup>B约200个）；
- 考虑探测器阈值100 eV，每吨靶物质每年可以探测到约280个太阳中微子事例；



暗物质直接探测实验中的中微子本底

高纯锗探测器的太阳中微子能谱

太阳中微子事例率与探测器阈值



# 总结



- $0\nu\beta\beta$ 实验是中微子性质研究中的一个重要方向；
- 面向下一代半衰期 $>10^{28}\text{yr}$ 和 $m_{\beta\beta}<10\text{meV}$ 的科学目标，国际上正在开展多种实验技术研究；
- **高纯锗探测器技术在下一代 $0\nu\beta\beta$ 实验中具有极强竞争力；**
- CDEX合作组启动**CDEX-300v实验**，开展300kg量级富集锗探测器实验系统建设；
- 目前正在针对**多项关键技术正在预研**，取得了一定进展；
- 未来逐步推动国际合作的吨级高纯锗 $0\nu\beta\beta$ 实验落户锦屏。



# 谢谢!

L.T. Yang, Tsinghua U., [yanglt@tsinghua.edu.cn](mailto:yanglt@tsinghua.edu.cn)