

2023年紫金山暗物质研讨会

CDEX实验现状与展望

刘书魁
四川大学

2023年12月30日



NNU · 南京师范大学
NANJING NORMAL UNIVERSITY

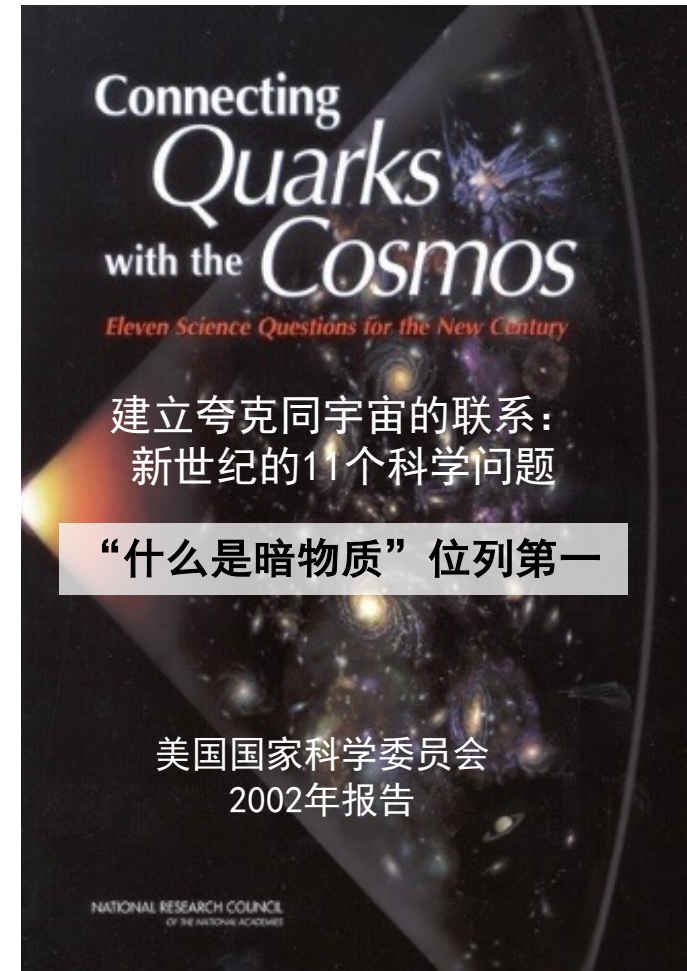
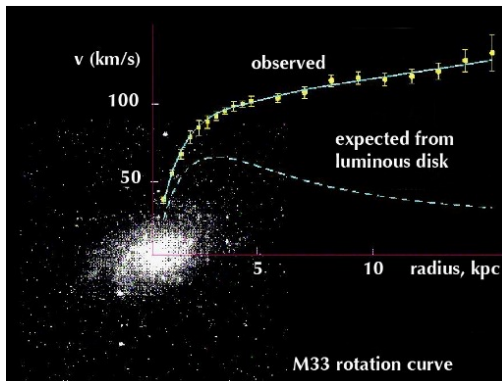
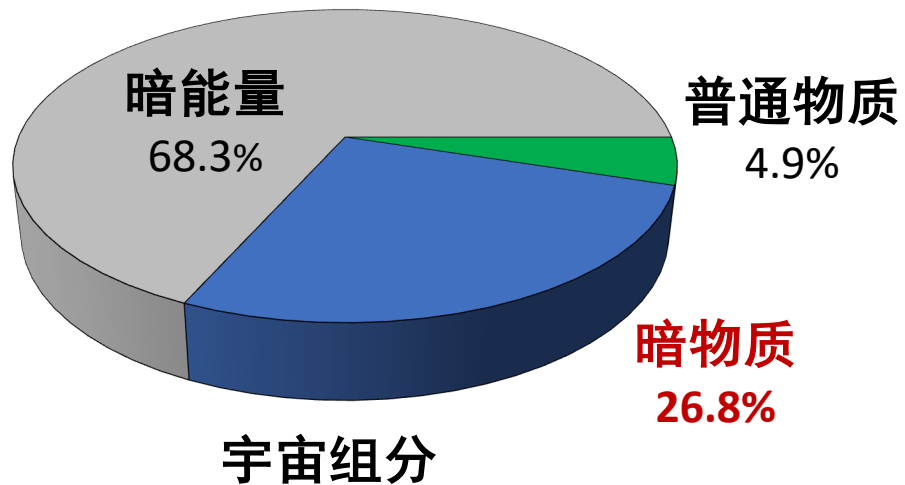


汇报提纲

- 暗物质直接探测和CDEX实验
- CDEX-1和CDEX-10实验现状
- CDEX-50 & CDEX-300v @ CJPL-II实验规划
- 下代实验的关键技术
- 总结

暗物质

- 暗物质占宇宙组分的26.8%，在物质起源和宇宙演化过程中具有重要地位；
- 暗物质研究是粒子物理、天文学和宇宙学的重大基础前沿课题。



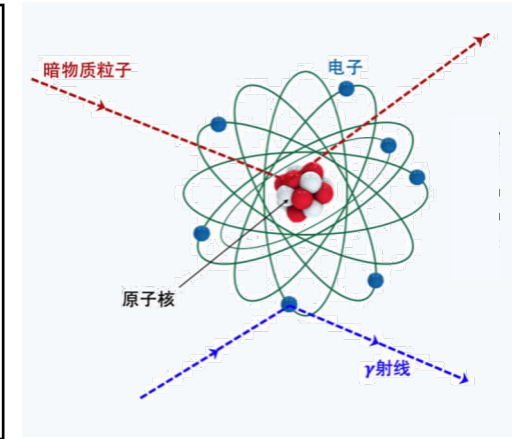
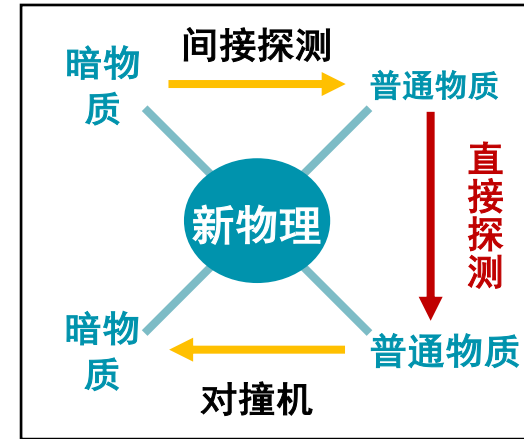
暗物质直接探测

➤ 三种暗物质探测方法：

直接探测、间接探测、对撞机生成

➤ 轻暗物质探测是近年来的研究热点；

➤ 轻暗物质探测的优势技术之一：**高纯锗**



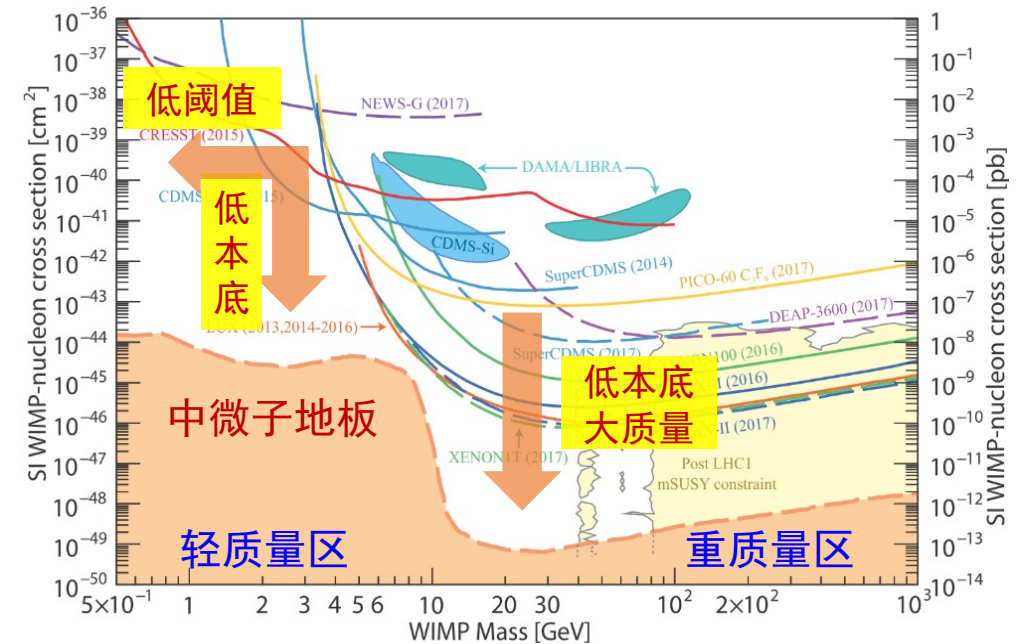
➤ 国际上两个主要技术路线：

- ✓ 点电极高纯锗 (CDEX, 美国CoGeNT)
- ✓ 电离量热高纯锗 (美国CDMS, 欧洲EDELWEISS)

技术难点
✓ 事例少 $< 1 \text{ evt}/(\text{kg}\cdot\text{yr})$
✓ 能量小 (sub-keV)

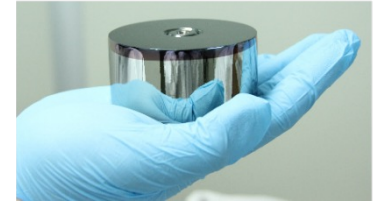
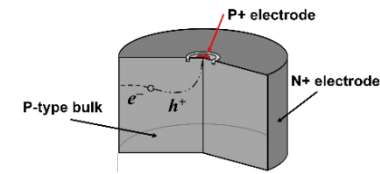


探测器要求
✓ 本底极低、靶质量大
✓ 阈值极低



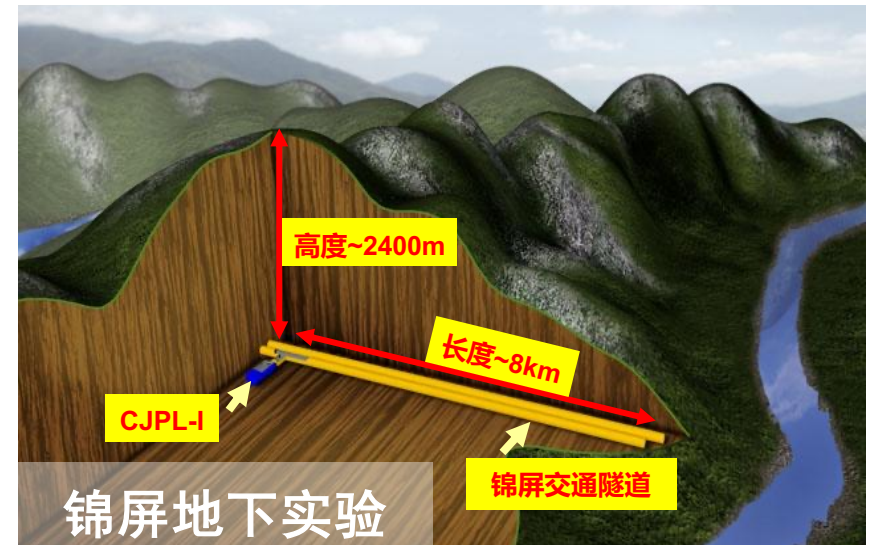
CDEX “盘古” 实验

- 2009年成立，11家单位，约100人
- 一项核心技术：**高纯锗探测器**
- 两个前沿物理：**暗物质探测 + 无中微子双贝塔衰**



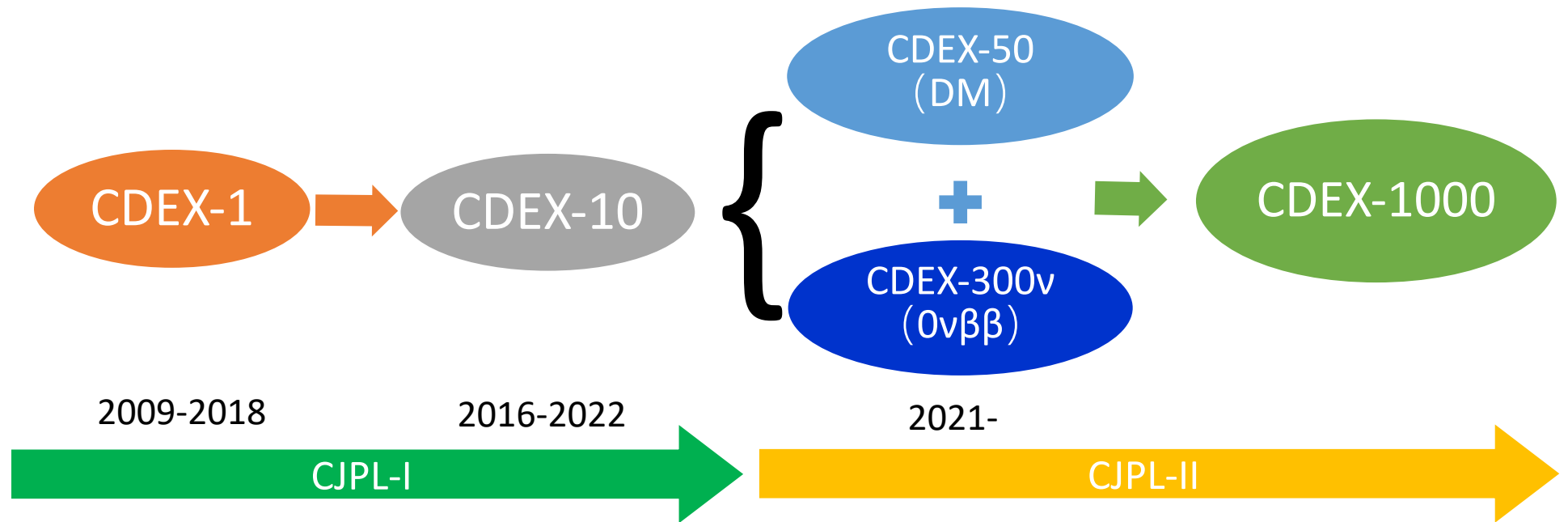
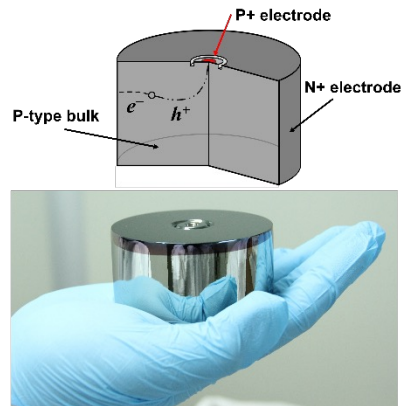
技术优势

- ✓ 能量分辨率高 ($< 0.12\%$)
- ✓ 能量阈值低 ($< 200 \text{ eV}$)
- ✓ 自身纯度极高 (~ 13 个9)
- ✓ 探测效率大 (单体尺寸达数kg级)



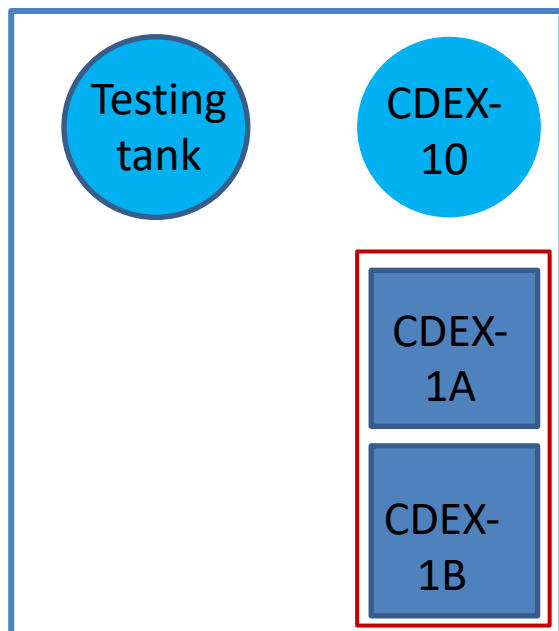
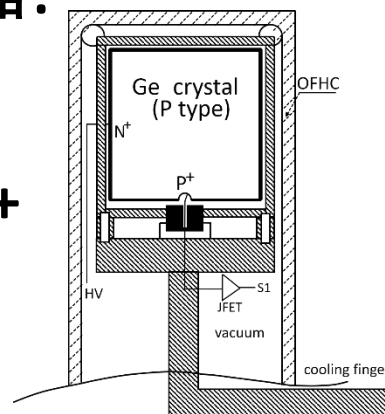
CDEX “盘古” 实验

- CDEX-1 (2009-2018) : 发展点电极高纯锗探测器技术, 开展本底研究
- CDEX-10 (2016-2022) : 液氮直冷的高纯锗阵列性能研究
- CDEX-50 (2021-202X) : 50公斤级液氮直冷高纯锗阵列实验系统
- CDEX-300v (2021-202X) : 300公斤级富集锗阵列实验系统

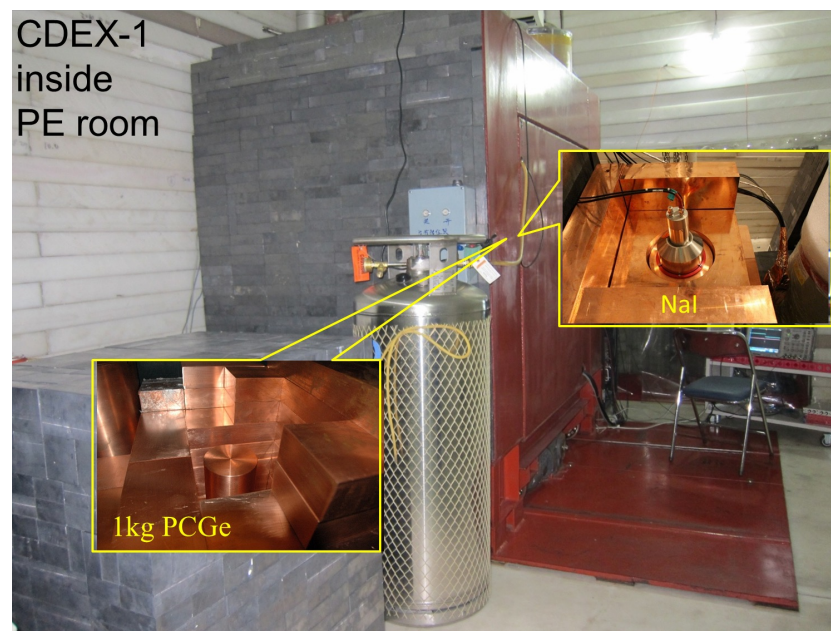


CDEX-1

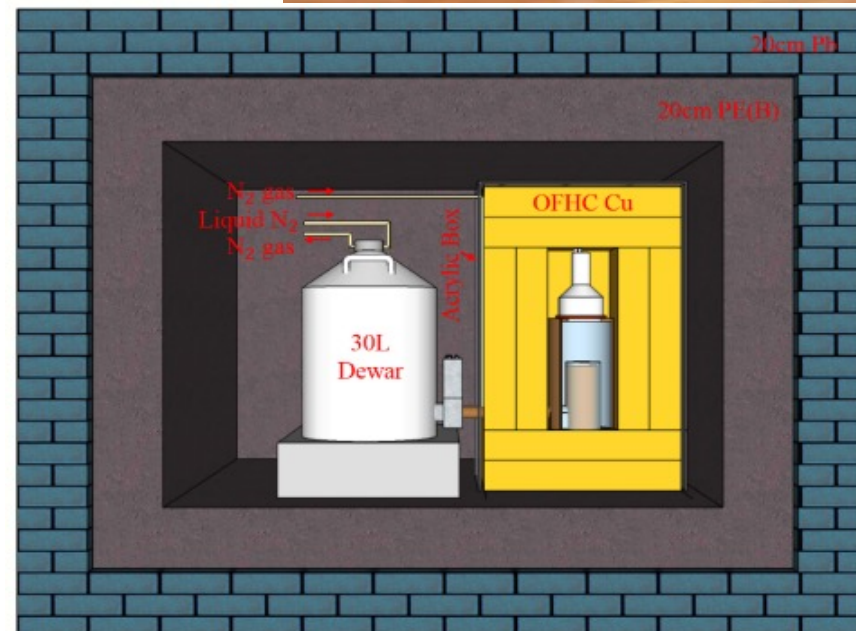
- CDEX-1: 两套单体1kg的**点电极高纯锗**探测器:
CDEX-1A(2011)→1B(upgraded, 2013);
- 传统的液氮冷指制冷; 低本底铅&铜屏蔽体+碘化钠反符合;
- 锦屏一期开展实验



Layout of PE room, CJPL-I



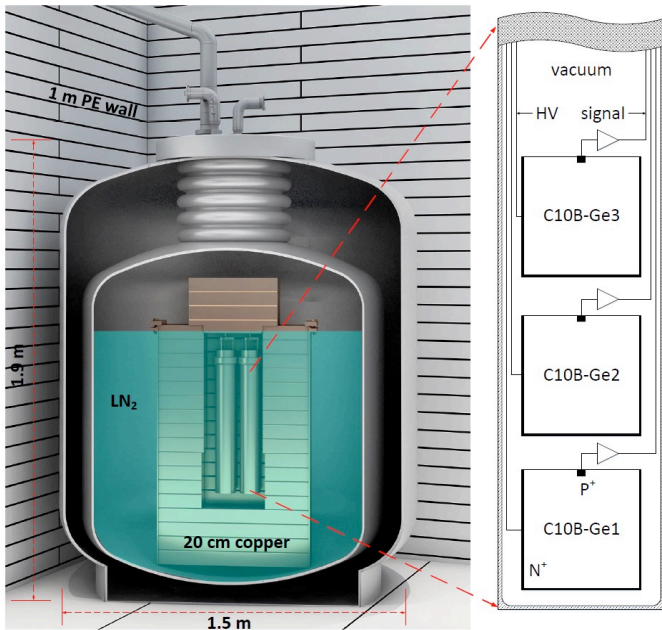
CDEX-1 inside PE room



CDEX-1A&B: 1kg PPC Ge×2

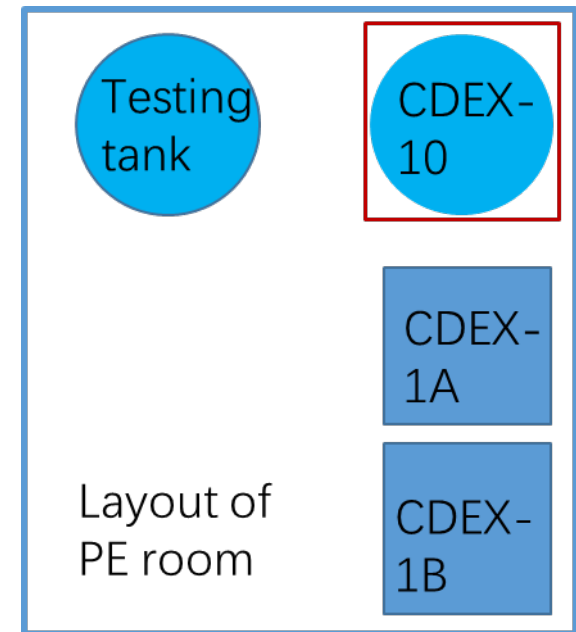
CDEX-10

- **P点电极锗阵列**探测器：3串，每串3个晶体，总重约10kg；
- 探测器阵列直接浸入液氮中；
- 未来百公斤实验的原型探测系统
 - 更纯净的液氮替换传统铜/铅屏蔽
 - 增大探测靶质量的阵列技术



CDEX-10: ~10kg PPC Ge array

Science China-PMA 62, 031012 (2019)

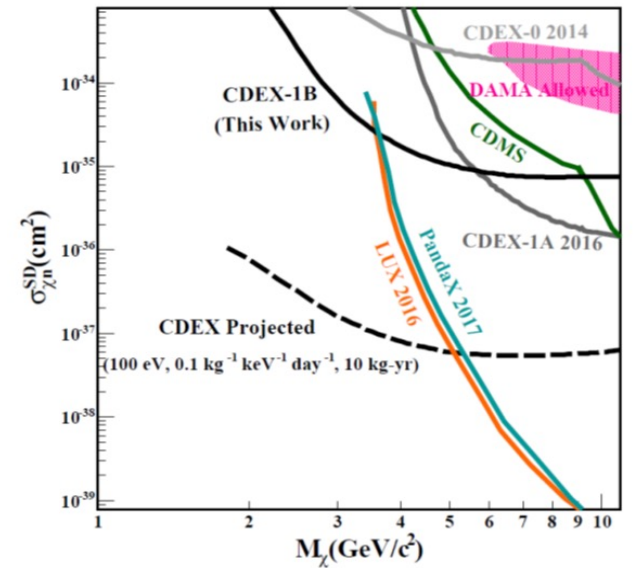
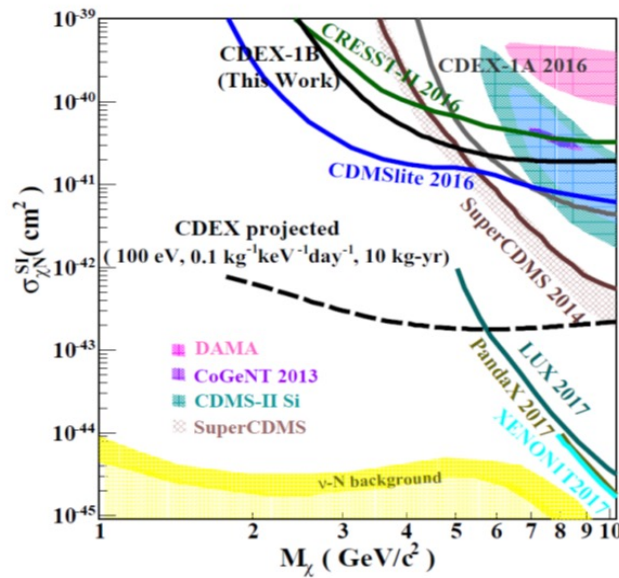
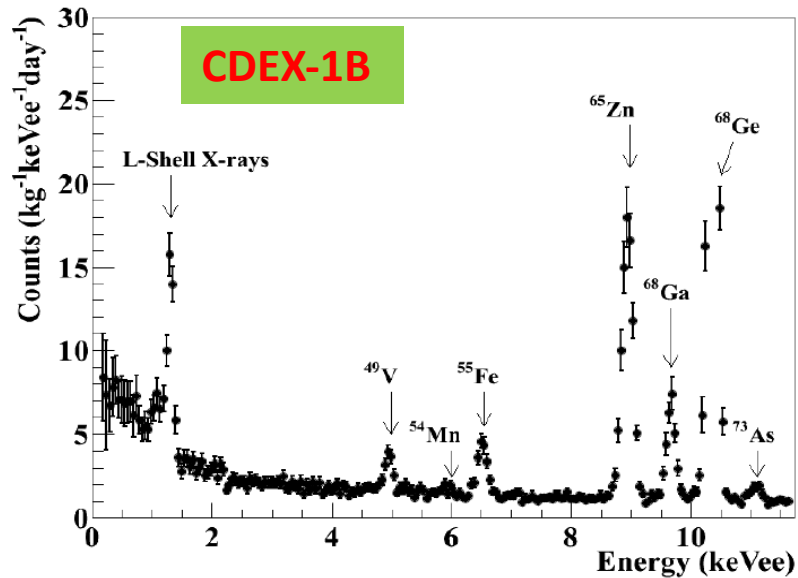


CDEX-1暗物质实验结果

- 大于4年 (Run-1&Run-2) 稳定运行, 超过1200公斤·天曝光量;
- 能量分析阈值160eVee, 国际首次将点电极高纯锗暗物质探测质量限下推至2 GeV;
- 基于CDEX-10实验数据给出4-5 GeV区间国际最灵敏实验结果;

暗物质源项:	
✓	WIMP (标准暗物质晕模型)
✓	年度调制效应 (速度导致)
✓	加速暗物质
✓	暗光子、轴子等
相互作用过程:	
✓	暗物质-核子 弹性散射
✓	暗物质-核子 非弹性散射
✓	暗物质-电子 弹性散射
✓	其他 (全能量沉积)

Time-integrated (TI) analysis: CPC 42, 023002, 2018

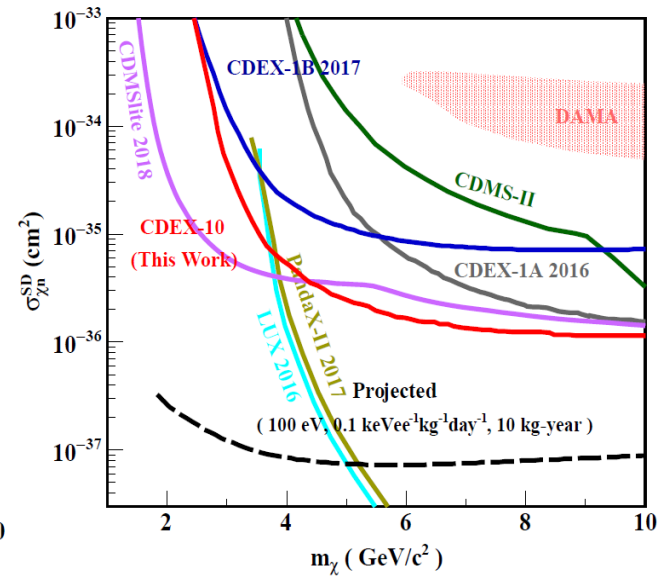
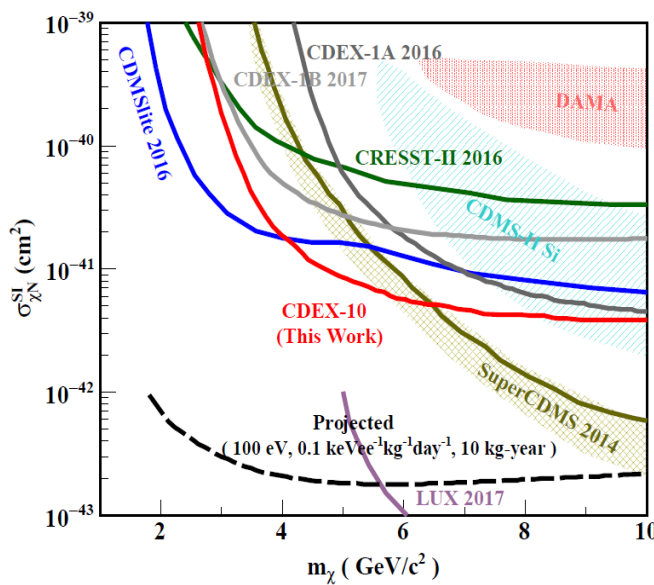
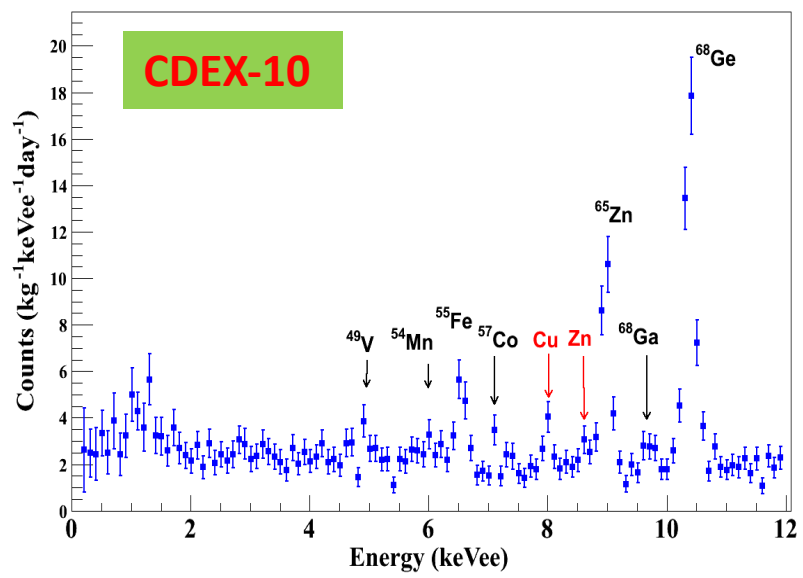


CDEX-10暗物质实验结果

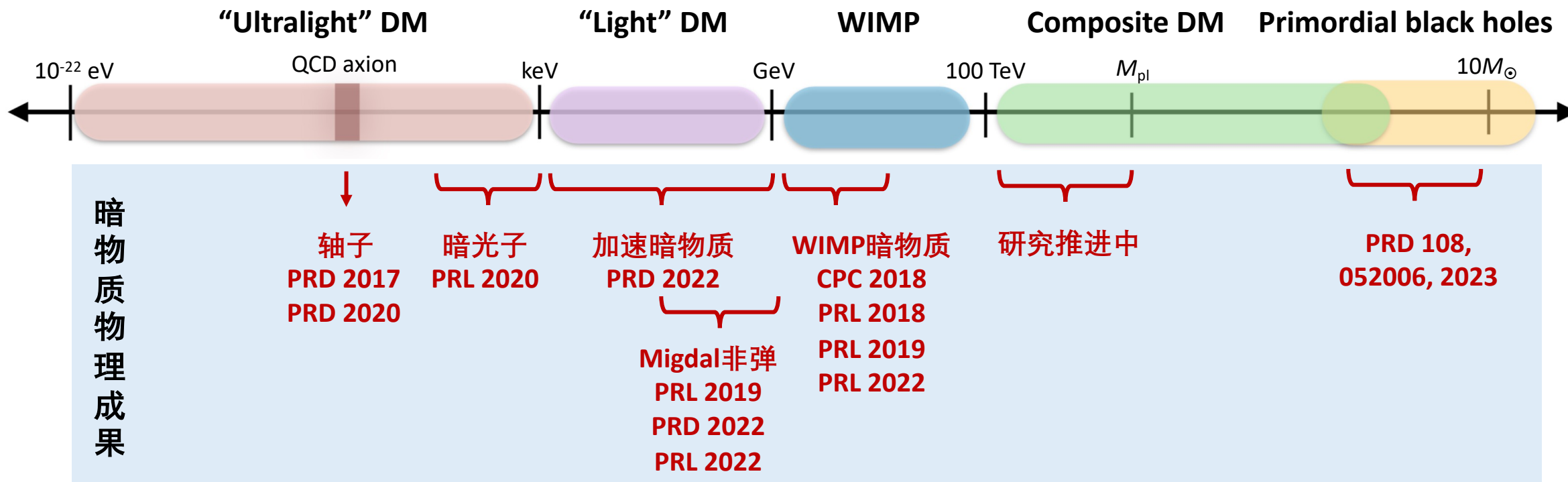
- 大于4年 (Run-1&Run-2) 稳定运行, 超过1200公斤·天曝光量;
- 能量分析阈值160eVee, 国际首次将点电极高纯锗暗物质探测质量限下推至2 GeV;
- 基于CDEX-10实验数据给出4-5 GeV区间国际最灵敏实验结果;

暗物质源项:	
✓	WIMP (标准暗物质晕模型)
✓	年度调制效应 (速度导致)
✓	加速暗物质
✓	暗光子、轴子等
相互作用过程:	
✓	暗物质-核子 弹性散射
✓	暗物质-核子 非弹性散射
✓	暗物质-电子 弹性散射
✓	其他 (全能量沉积)

PRL 120, 241301 (2018)



暗物质找寻



WIMP search

- Boosted WIMP: down to $\mathcal{O}(10 \text{ keV})$
- Migdal effect: down to $\mathcal{O}(10 \text{ MeV})$
- $\chi - e$ scattering down to $\mathcal{O}(10 \text{ MeV})$

New physics

- Axion like particle: down to $\mathcal{O}(100 \text{ eV})$
- Dark photon: down to $\mathcal{O}(100 \text{ eV})$
- Exotic dark matter: down to $\mathcal{O}(1 \text{ MeV})$

暗物质年度调制效应研究

- 利用CDEX四年实验数据，6 GeV以下世界最好的年度调制灵敏度；
- 排除了美国CoGeNT实验宣称探测到的“疑似”暗物质信号；

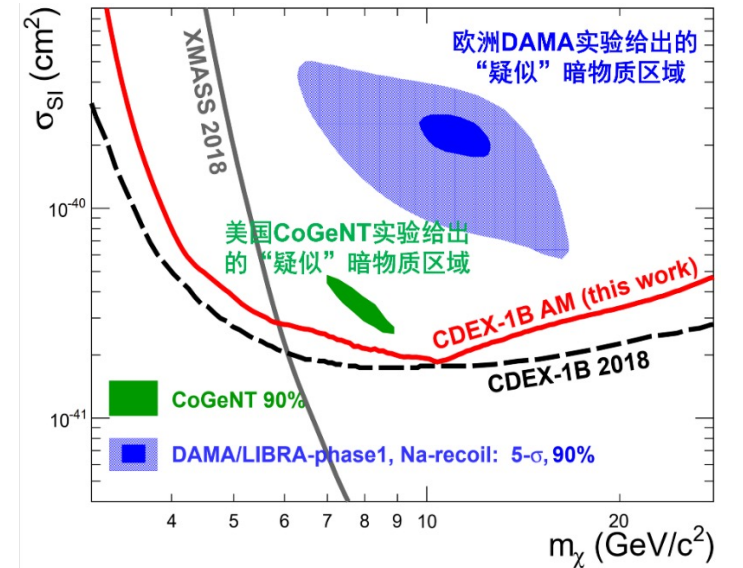
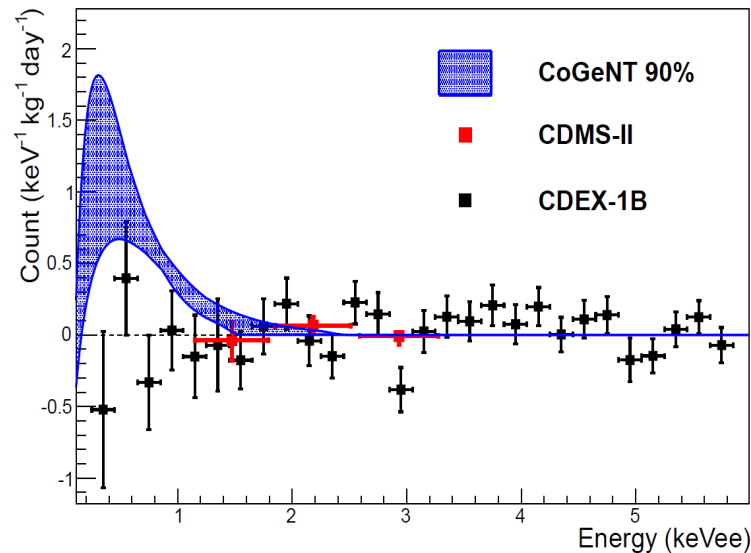
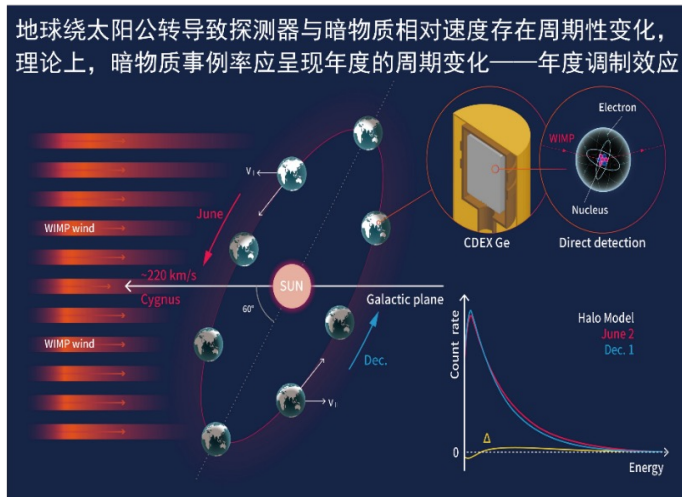
暗物质源项：

- ✓ WIMP (标准暗物质晕模型)
- ✓ 年度调制效应 (速度导致)
- ✓ 加速暗物质
- ✓ 暗光子、轴子等

相互作用过程：

- ✓ 暗物质-核子 弹性散射
- ✓ 暗物质-核子 非弹性散射
- ✓ 暗物质-电子 弹性散射
- ✓ 其他 (全能量沉积)

PRL 123, 221301 (2019)



非弹性散射：Migdal效应

Migdal effect

- ❑ Elastic scattering: $\chi + N \rightarrow \nu + N(E_R)$
- ❑ Migdal effect: $\chi + A \rightarrow \chi + N(E_R) + e^-(E_{EM})$

➤ 利用Migdal效应测量轻暗物质，在**50-180 MeV质量区间**截面限制灵敏度达到**世界最好水平**；

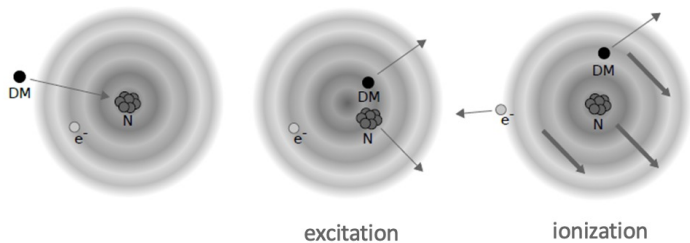
暗物质源项：

- ✓ **WIMP (标准暗物质晕模型)**
- ✓ 年度调制效应 (速度导致)
- ✓ 加速暗物质
- ✓ 暗光子、轴子等

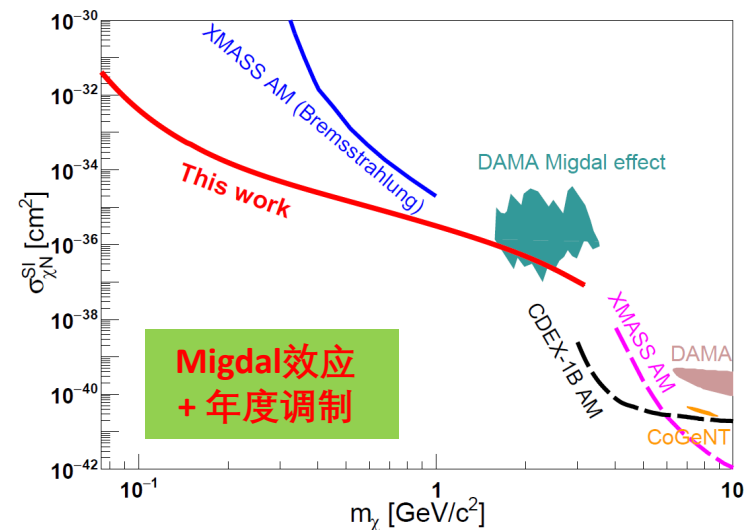
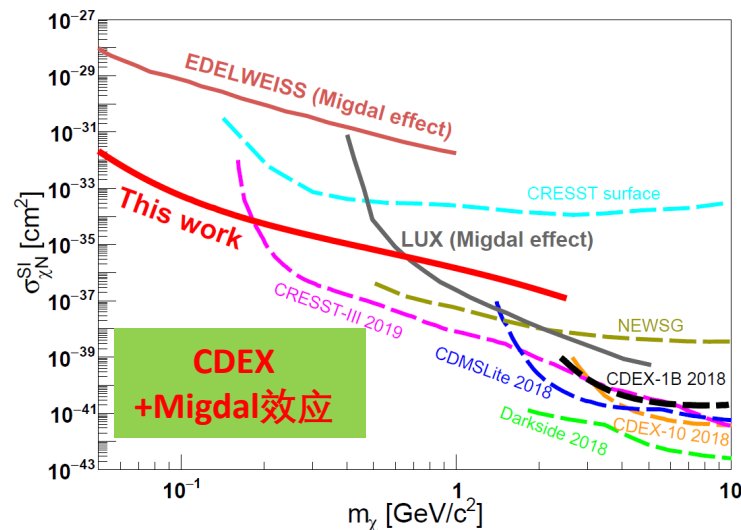
相互作用过程：

- ✓ 暗物质-核子 弹性散射
- ✓ **暗物质-核子 非弹性散射**
- ✓ 暗物质-电子 弹性散射
- ✓ 其他 (全能量沉积)

PRL 123, 161301 (2019)



- Ge, $v_\chi = 776 \text{ km/s}$, $m_\chi = 0.05 \text{ GeV}/c^2$
 $E_{EM,max} = 167 \text{ eV}$, $E_{R,max} = 1 \text{ eV}$



ref: Migdal effect (M. Ibe et al., 2018)

暗物质-电子相互作用

- 开展了暗物质-电子相互作用实验研究；
- 100 MeV以上质量区间国际最灵敏的固体探测器实验限制；
- 国际首个基于液氮温区高纯锗探测器的实验结果；

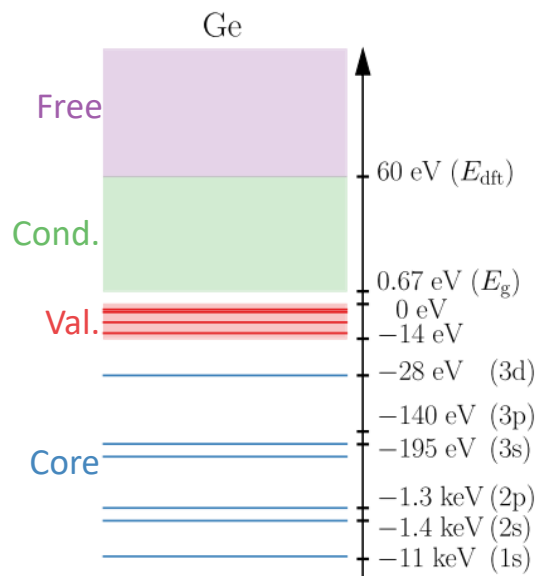
暗物质源项：

- ✓ WIMP (标准暗物质晕模型)
- ✓ 年度调制效应 (速度导致)
- ✓ 加速暗物质
- ✓ 暗光子、轴子等

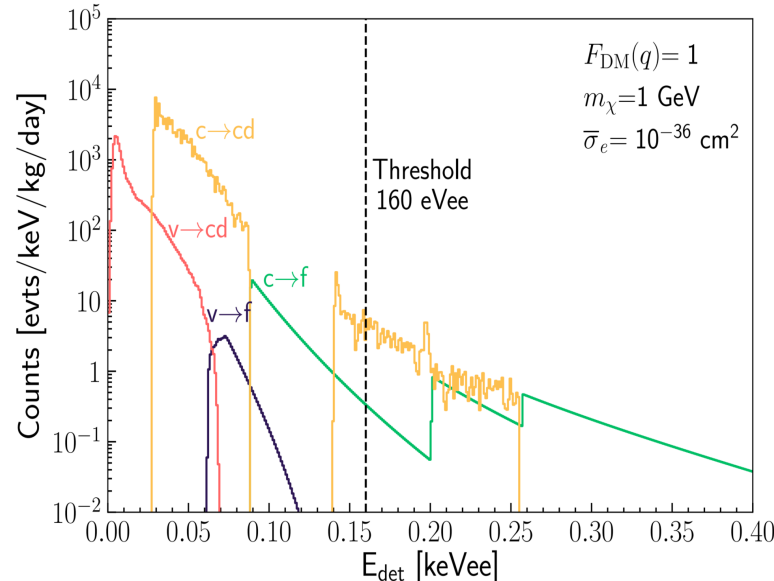
相互作用过程：

- ✓ 暗物质-核子 弹性散射
- ✓ 暗物质-核子 非弹性散射
- ✓ 暗物质-电子 弹性散射
- ✓ 其他 (全能量沉积)

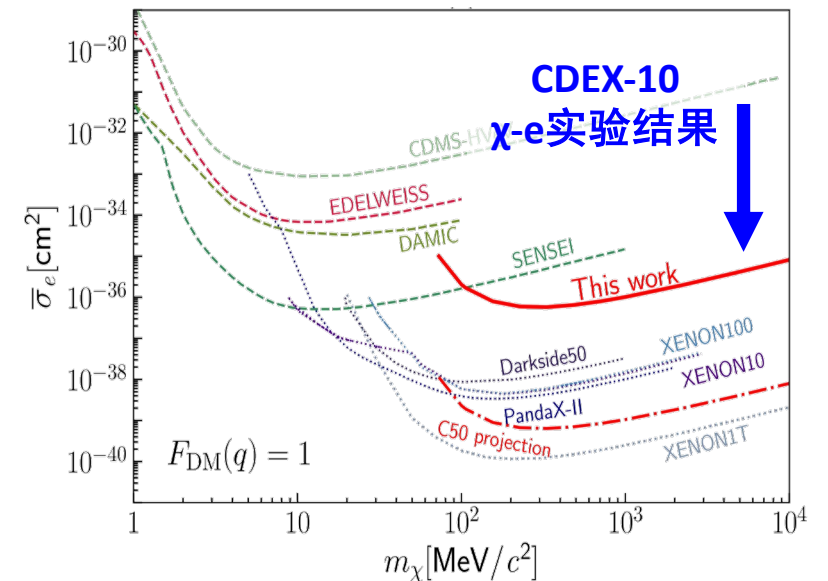
PRL 129, 221301 (2022)



Ge壳层电子



Ge预期能谱

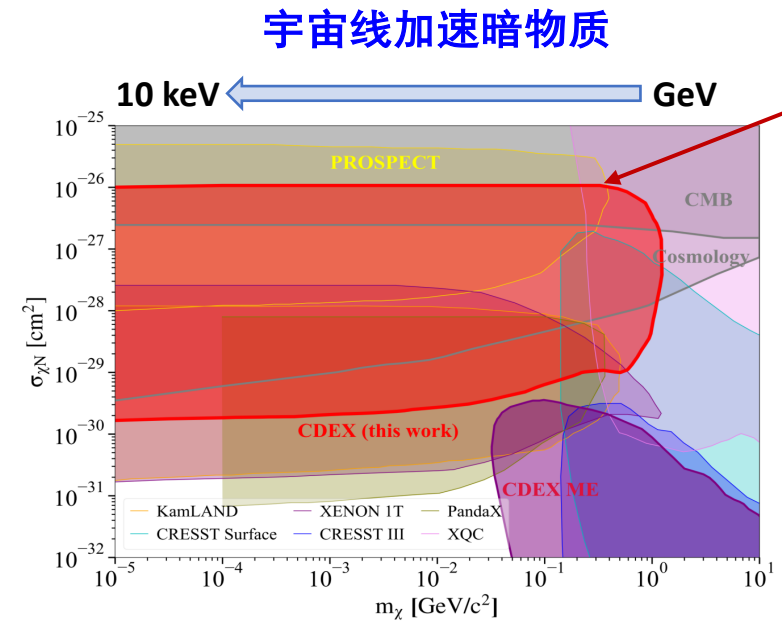


CDEX-10实验结果

加速暗物质、地球屏蔽效应

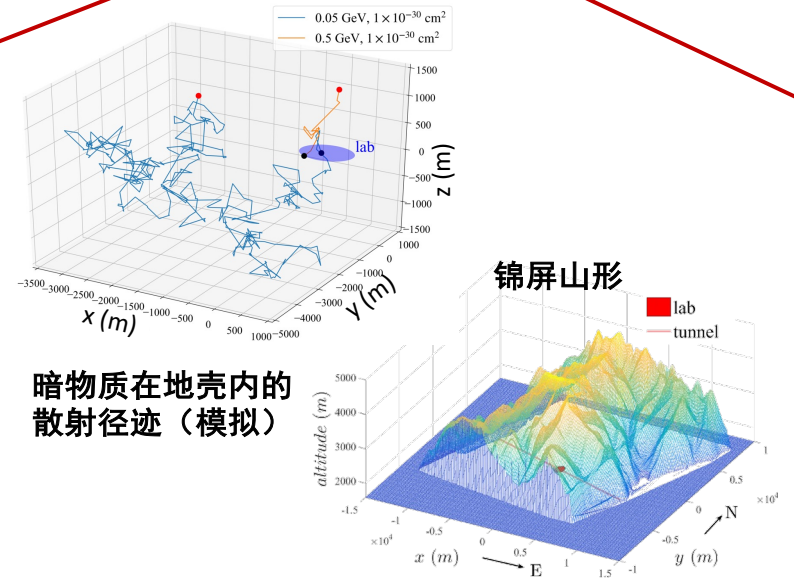
- 宇宙线加速轻暗物质探测，给出比宇宙学更灵敏的截面限制；
- 开展了地球屏蔽效应研究，修正并完善了CDEX实验结果表示（排除线→排除区域）；

- 暗物质源项：**
- ✓ WIMP (标准暗物质晕模型)
 - ✓ 年度调制效应 (速度导致)
 - ✓ **加速暗物质**
 - ✓ 暗光子、轴子等
- 相互作用过程：**
- ✓ **暗物质-核子 弹性散射**
 - ✓ 暗物质-核子 非弹性散射
 - ✓ 暗物质-电子 弹性散射
 - ✓ 其他 (全能量沉积)



PRD 106, 052008 (2022)

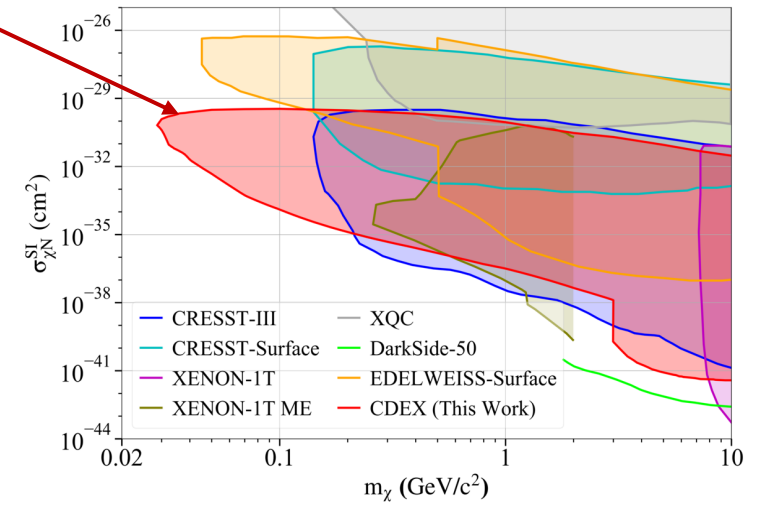
地球屏蔽效应给出的排除区域上限



暗物质在地壳内的散射径迹 (模拟)

PRD 105, 052005 (2022)

Migdal效应轻暗物质探测

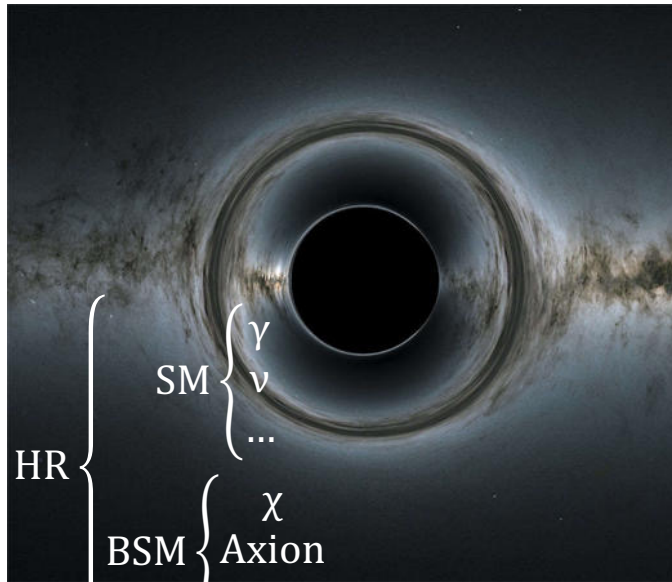


原初黑洞蒸发轻暗物质

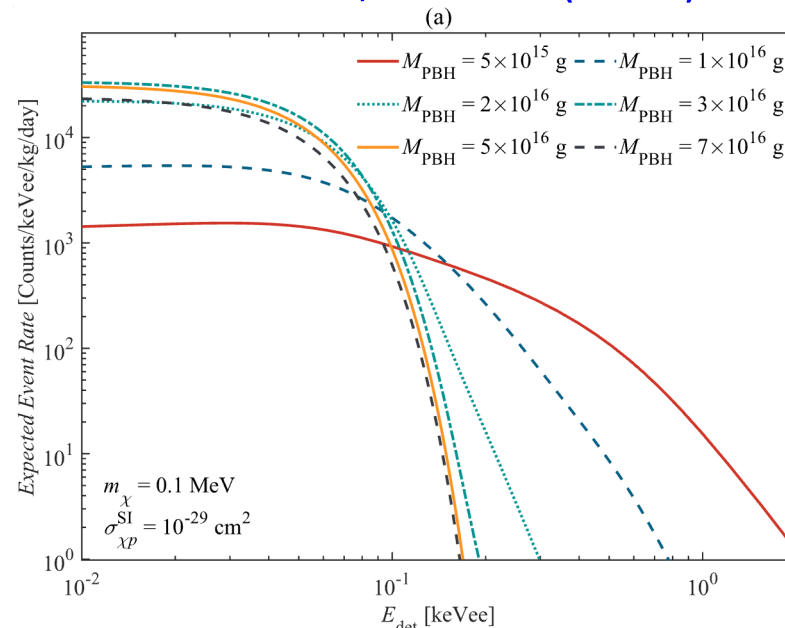
- 开展了原初黑洞蒸发轻暗物质粒子的实验研究，对于 $1 \times 10^{15} \text{g}$ 至 $7 \times 10^{16} \text{g}$ 的原初黑洞蒸发出来的轻暗物质粒子给出新的实验限制；
- 低阈值高纯锗技术在研究大质量原初黑洞物理方面的潜力；

- 暗物质源项：**
- ✓ WIMP (标准暗物质晕模型)
 - ✓ 年度调制效应 (速度导致)
 - ✓ **加速暗物质**
 - ✓ 暗光子、轴子等
- 相互作用过程：**
- ✓ **暗物质-核子 弹性散射**
 - ✓ 暗物质-核子 非弹性散射
 - ✓ 暗物质-电子 弹性散射
 - ✓ 其他 (全能量沉积)

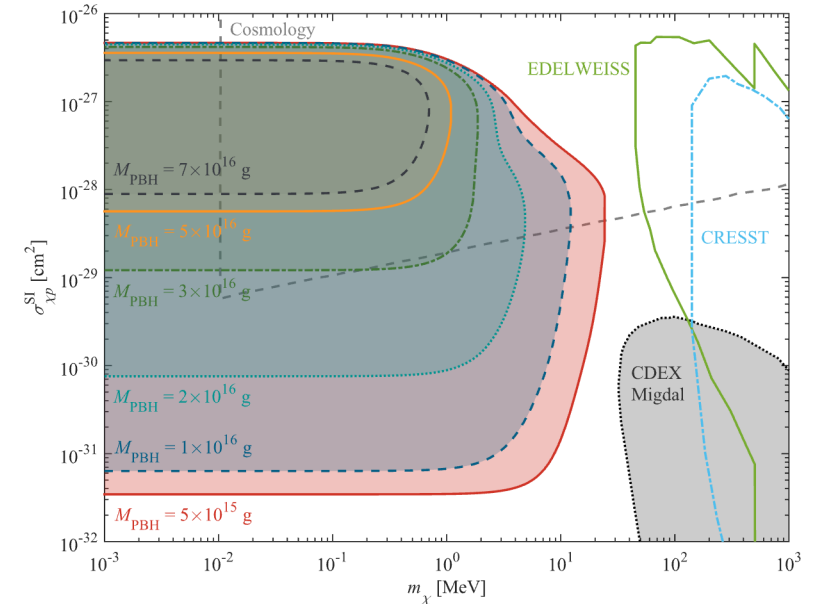
PRD 108, 052006 (2023)



霍金辐射蒸发暗物质粒子



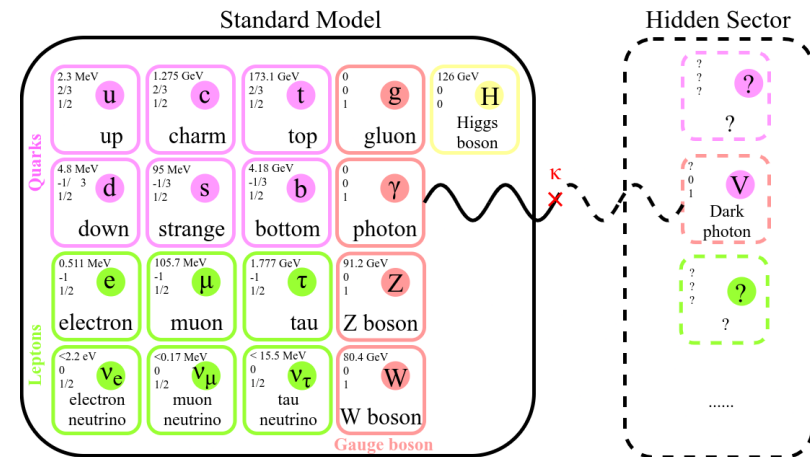
PBHDM在高纯锗探测器中的预期能谱



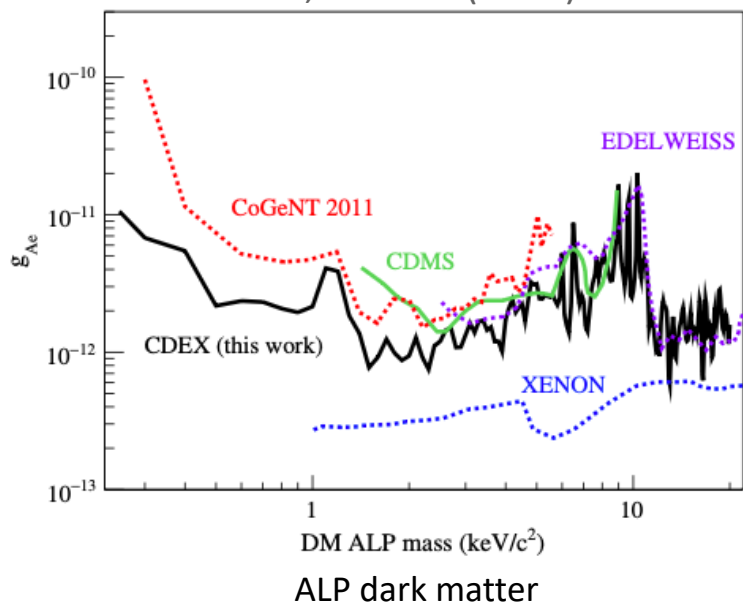
CDEX-10对PBHDM的实验限制

轴子、暗光子

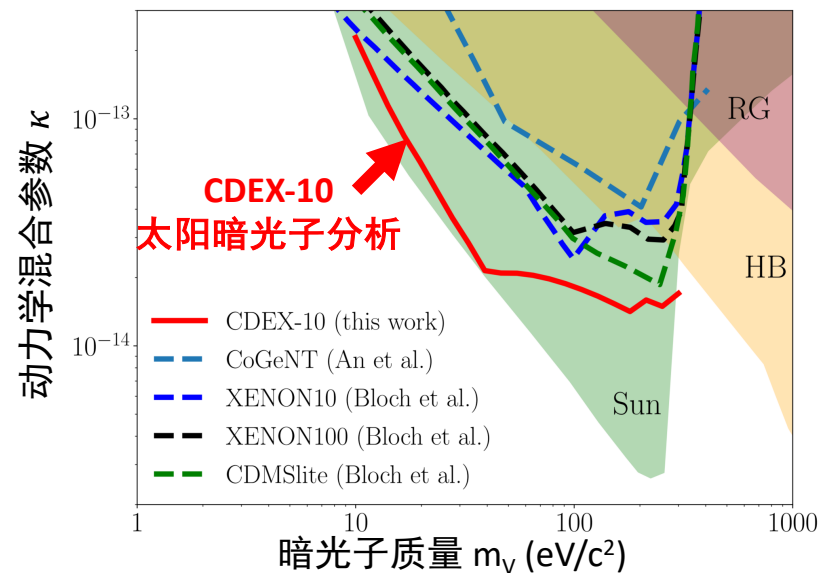
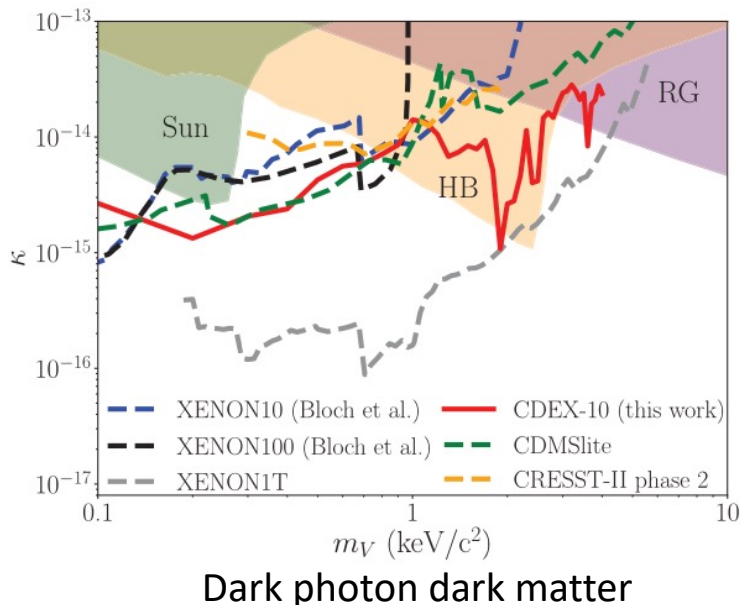
- 探索除WIMP以外更多暗物质候选者，如**暗光子**、**轴子**等；
- **暗光子研究：10-300 eV区间国际最严格的直接探测实验限制；**



PRD 101, 052003 (2020)
PRD 95, 052006 (2017)



PRL 124, 111301 (2020)



ref: An, H. et. al., PRL 111:041302 (2013)

奇异暗物质搜寻

➤ 奇异暗物质相互作用：

- 费米子暗物质中性流吸收： $\chi + N \rightarrow \nu + N$
- 暗物质-核子3→2非弹性散射信号： $\chi + \chi + N \rightarrow \phi + N$

➤ 上述两个相互作用，得到低质量区域新的限制

暗物质源项：

- ✓ WIMP (标准暗物质晕模型)
- ✓ 年度调制效应 (速度导致)
- ✓ 加速暗物质

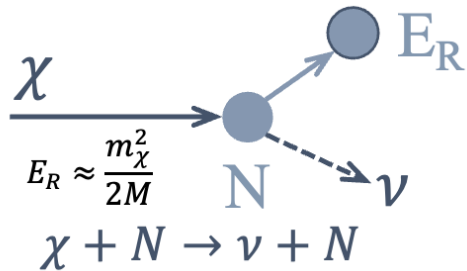
✓ 暗光子、轴子等

相互作用过程：

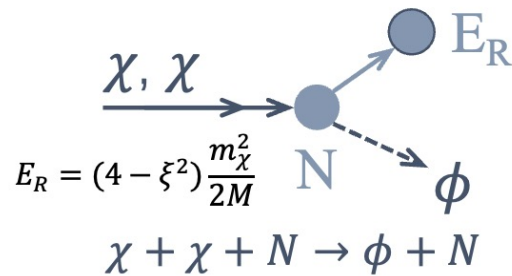
- ✓ 暗物质-核子 弹性散射
- ✓ 暗物质-核子 非弹性散射
- ✓ 暗物质-电子 弹性散射

✓ 其他 (全能量沉积)

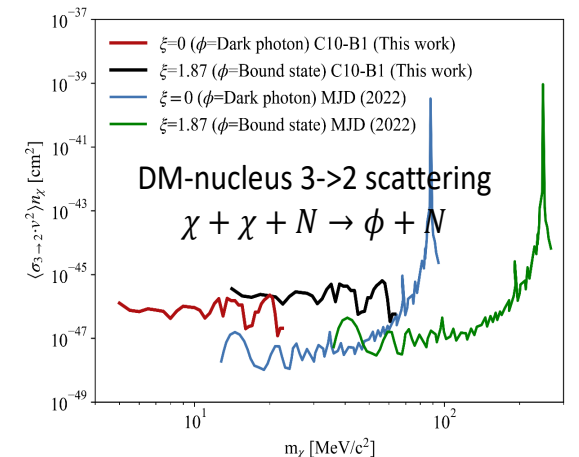
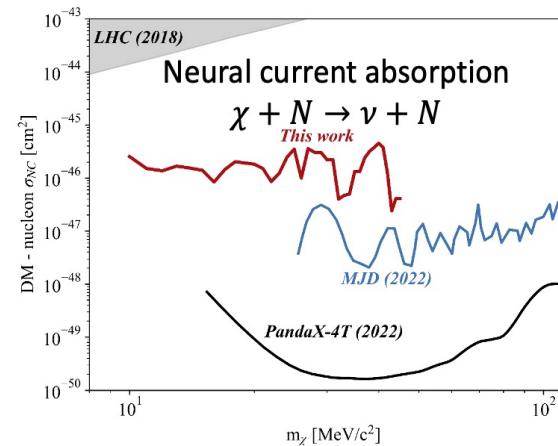
PRL 129, 221802 (2022)



- ν is neutrino
- Generates a monoenergetic signal



- ϕ is either a DM composite state or any dark radiation
- Generates a monoenergetic signal



[1] Jeff A. Dror, et al., Phys. Rev. Lett. 124, 181301 (2020);

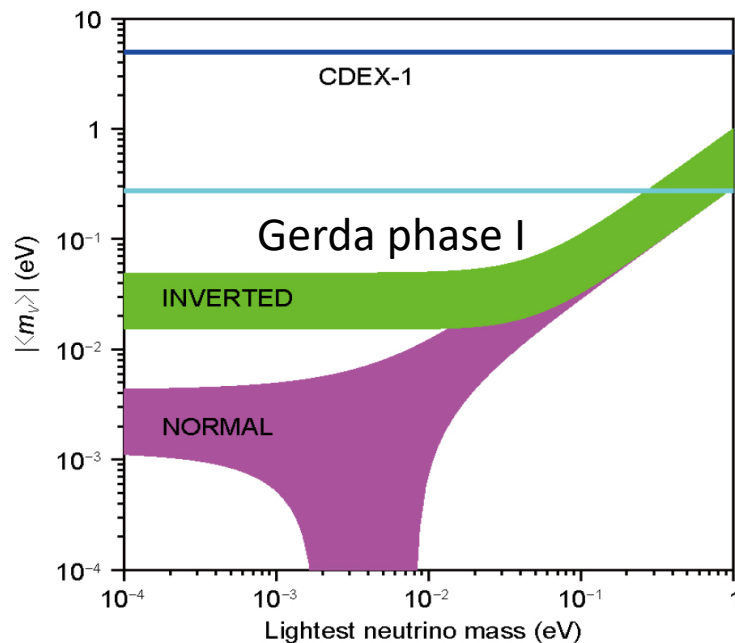
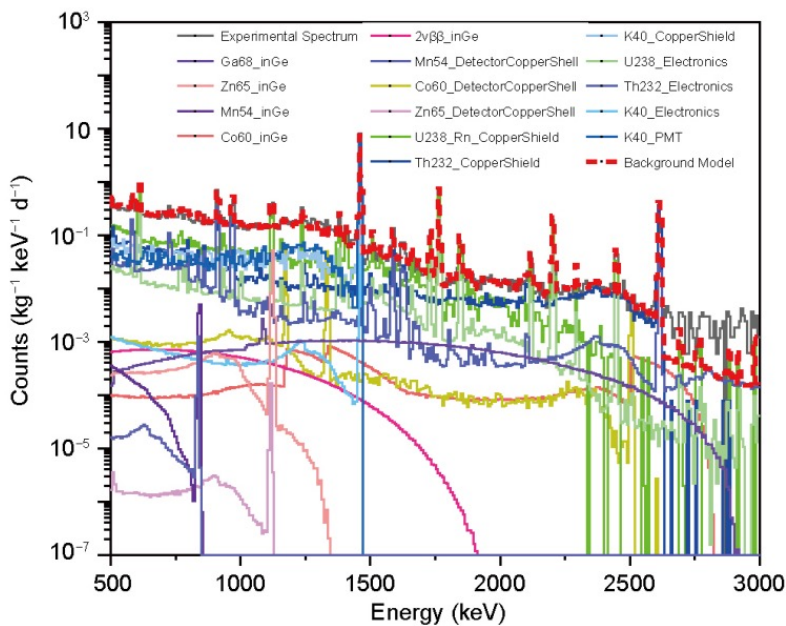
[2] W. Chao, et al., arXiv:2109.14944 (2021)

锗-76无中微子双贝塔衰变

- 2017年，合作组发表了国内首个锗-76无中微子双贝塔衰变实验结果（CDEX-1A）；
- 2022年，针对未来 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验本底抑制、波形甄别方法，进行技术预研（BEGe）；

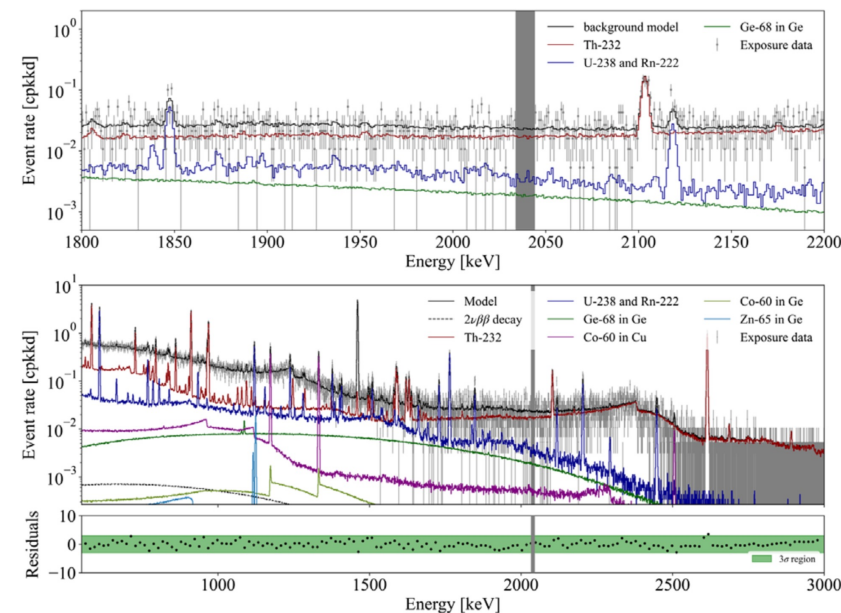
Sci. China PMA. 60, 071011 (2017)

国内首个锗-76无中微子双贝塔衰变实验结果



PRD 106, 032012(2022)

未来 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验波形甄别方法预研



提高探测灵敏度

增大有效曝光量

➤ 增大探测器质量

➤ ^{76}Ge 富集 (>86% 富集度)

本底控制

➤ 宇生本底控制

➤ CJPL-II减少宇宙线本底

➤ 尽量减少锗在地面的时间

➤ 本底抑制算法研究

➤ 减少锗晶体附近的放射性本底

➤ 改变屏蔽体结构: Cu/Pb/PE --> 液氮

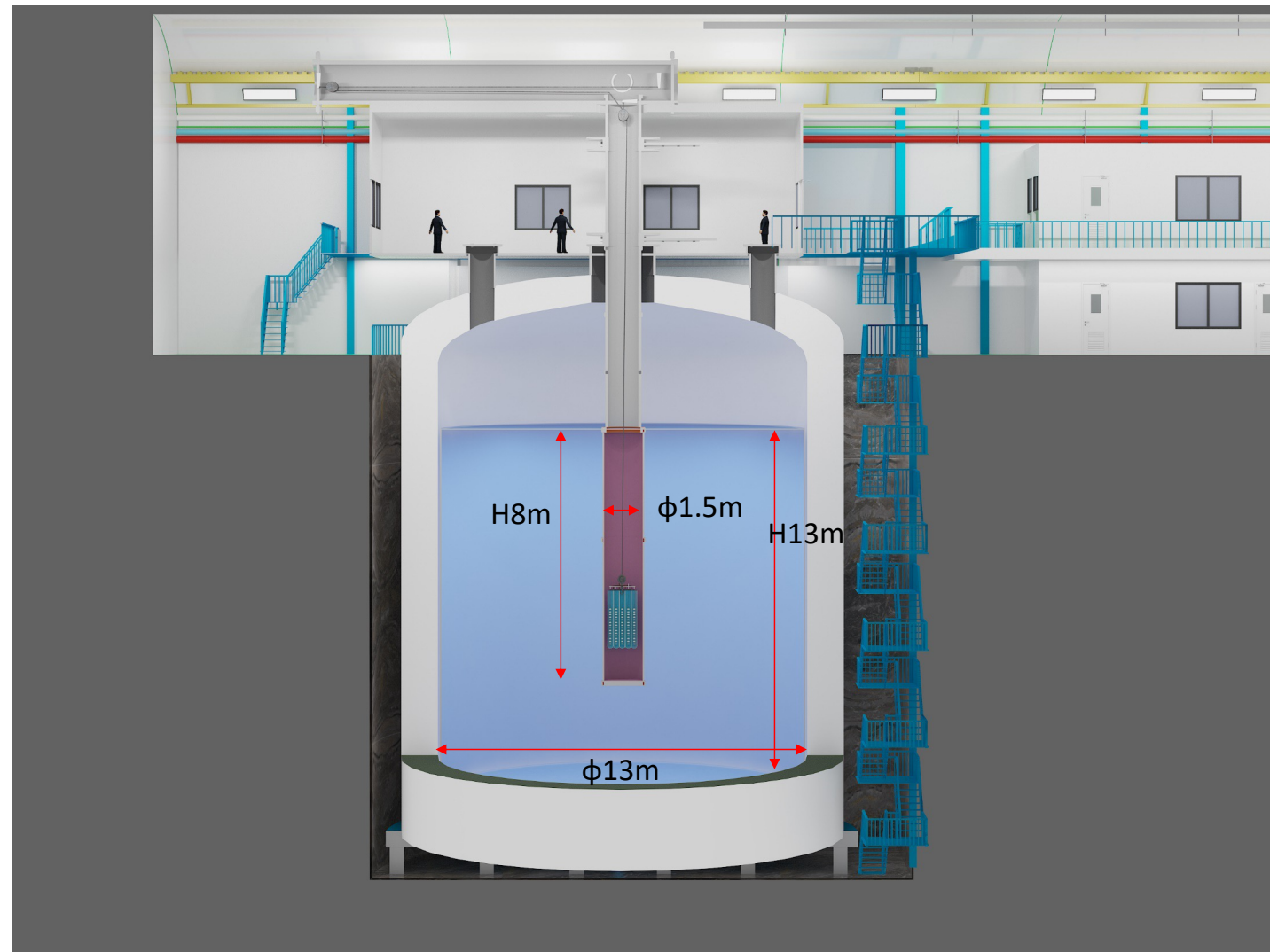
➤ 锗晶体直接裸浸在液氮中, 无制冷系统的本底

➤ 采用低温、低本底、低噪声前端电子学

➤ 严格的低本底材料筛选

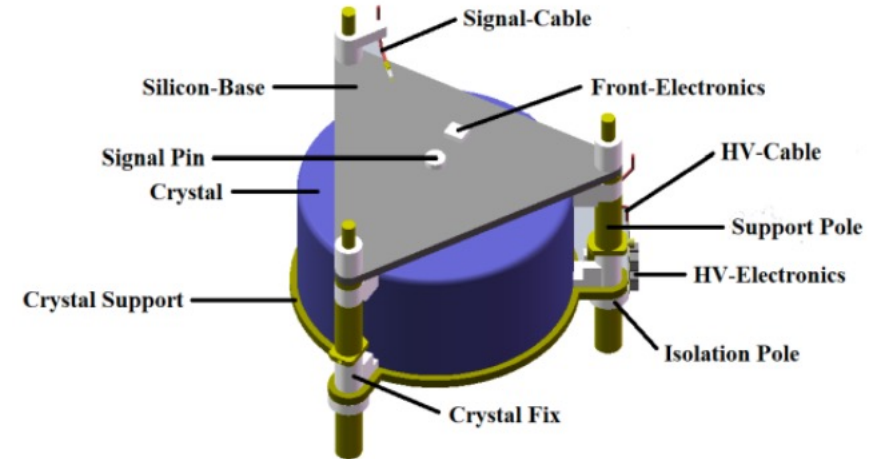
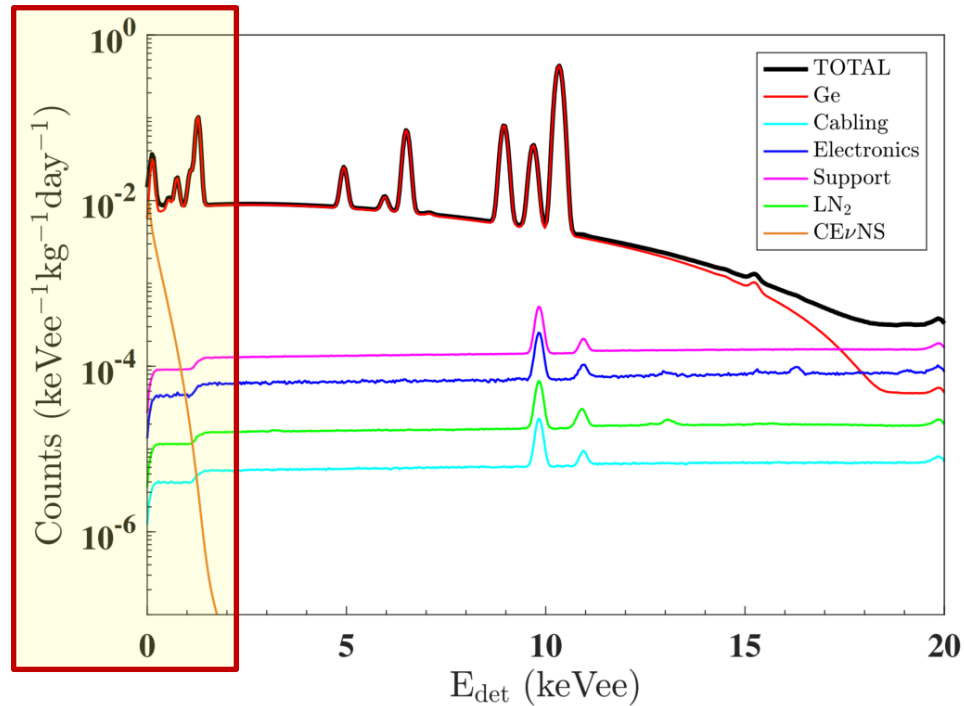
CDEX-50 & CDEX-300 ν @ CJPL-II

- CJPL-II, 宇宙线可忽略
- 1725m³ 大型液氮罐作为制冷和屏蔽体
- 超过6m厚液氮有效屏蔽外部本底
- 锗晶体裸浸在液氮/液氩中
- 靠近锗的前放换成低本底ASIC前放



CDEX-50 本底模拟

- 本底水平: $<0.01 \text{ cts}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{day}) @1 \text{ keV}$
- 本底主要来自锗晶体的宇生核素, 如 ^3H 、 ^{68}Ge
- 对CEvNS和M层 X-ray本底有更好理解



高纯锗阵列单元

Category	Component	Material	Quantity[g]
Crystal	Crystal	Germanium (Ge)	~1000
Cabling	HV-Cable	PTFE, Copper	3.7
	Signal-Cable	PTFE, Copper	5.4
Electronics	Signal Pin	Copper	0.4
	HV/Front-Electronics	PCB	10.2
		Resistor, Capacitor	
Support	Crystal Support	Copper	27.6
	Support Pole	Copper	58.1
	Crystal Fix	PTFE	19.3
	Isolation Pole	PTFE	8.4
	Silicon-Base	Silicon	30.2
TOTAL			1163.3

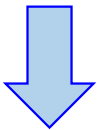
* CEvNS (Coherent Elastic neutrino-Nucleus Scattering)

CDEX-50 预期灵敏度

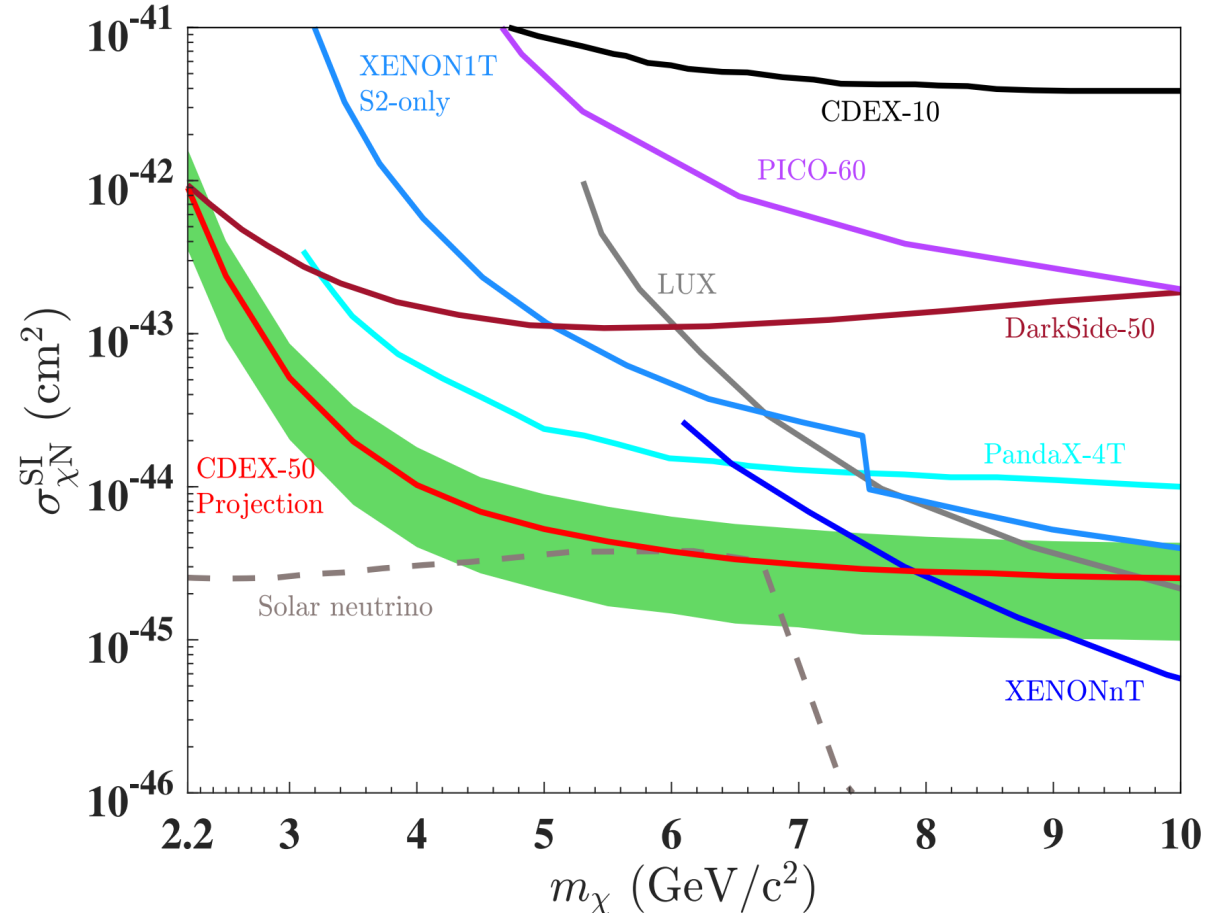
- 本底水平: <0.01 cts/(keV·kg·day) @1 keV
- 数据分析能量阈值: 160 eV
- 曝光量: ~ 50 kg·year
- WIMP自旋无关灵敏度达到 10^{-44} cm²

arXiv:2309.01843 (2023)

本底@1keV: 2 cpkkd
灵敏度: 10^{-42} cm² 量级



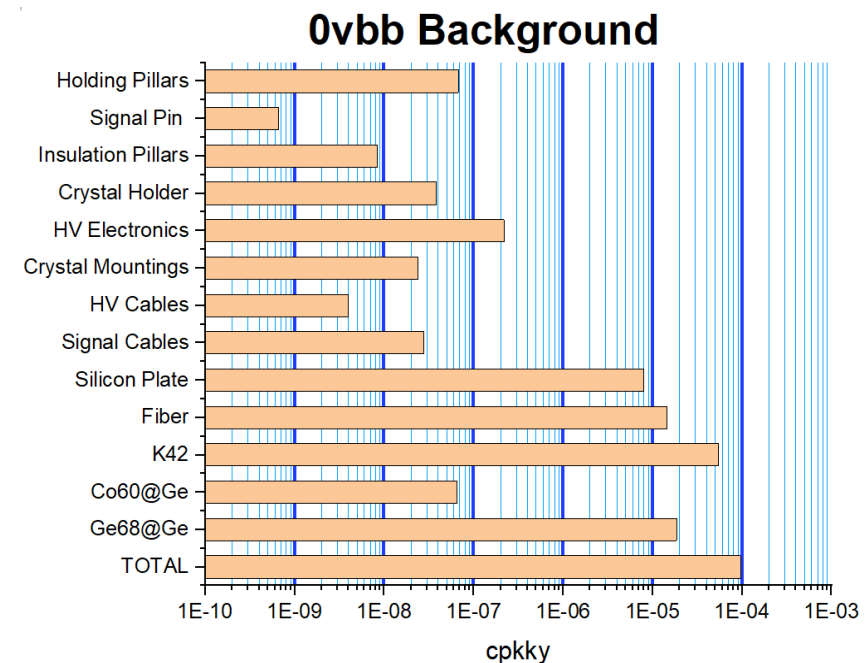
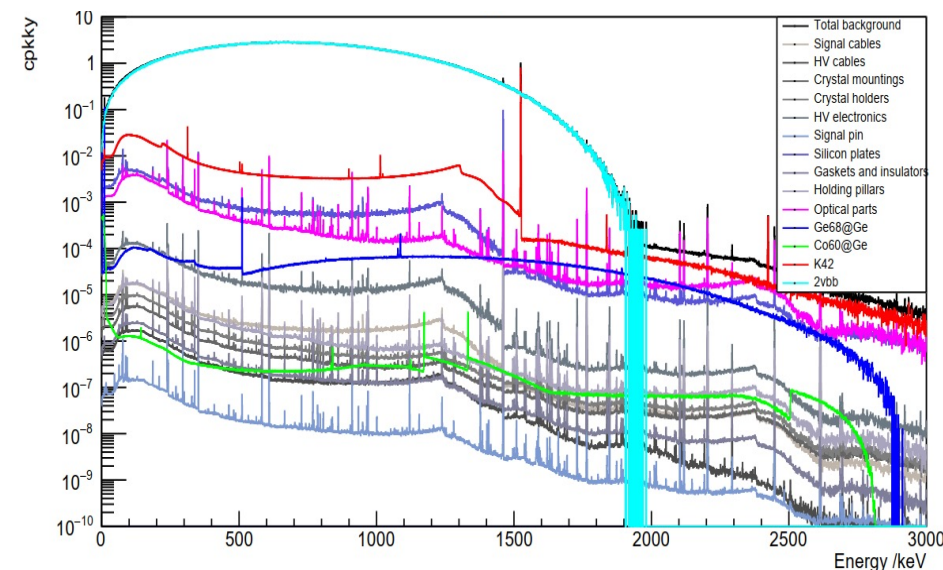
本底@1keV: 0.01 cpkkd
灵敏度: 10^{-44} cm² 量级



CDEX-300实验规划

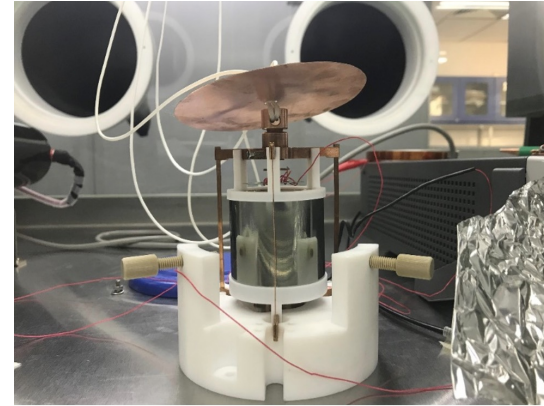
- 建造：2021-2026, 运行：2027-2031
- 能量分辨率：0.12% [FWHM@2.039MeV](#)
- 本底指数： 1×10^{-4} cpkky (cts/(keV · kg · year))
- ^{76}Ge 曝光量 $> 1\text{t}\cdot\text{y}$, $T_{1/2} > 10^{27}\text{y}$.

Parameter	CDEX-300
^{76}Ge mass	>225 kg
BI@2039keV	10^{-4} cpkky
E_R @2039keV	2.5 keV (FWHM)
Run time	5 y (2027-2031)
Exposure	1.125 t·y
$T_{1/2}$	$>1 \times 10^{27}\text{y}$
$m_{\beta\beta}$	28.5~68.0 meV

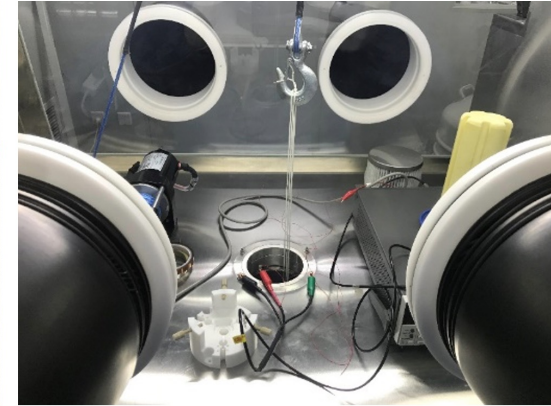


关键技术：锗探测器制备

- 已掌握不同类型锗探测器的制备技术
- 性能达到商业产品水平，且性能长期稳定
- 针对暗物质/无中微子实验进行的锗技术研究

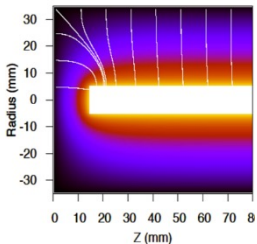
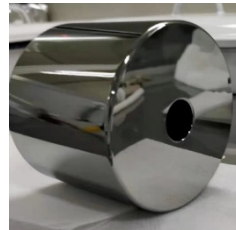
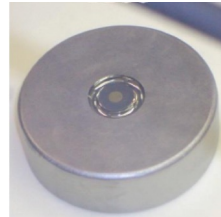
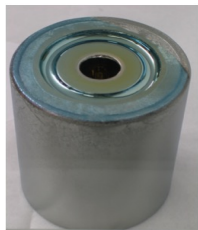


Bare HPGe detectors

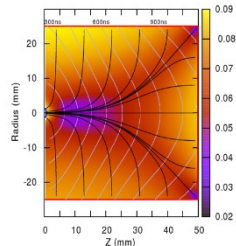


Bare HPGe in LN₂

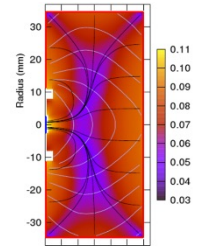
PPC: $\phi 50\text{mm} \times 50\text{mm}$, Depleted voltage: $\sim 800\text{V}$



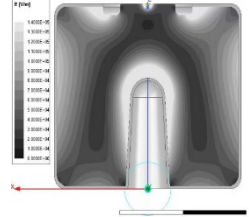
Co-axial



PCGe

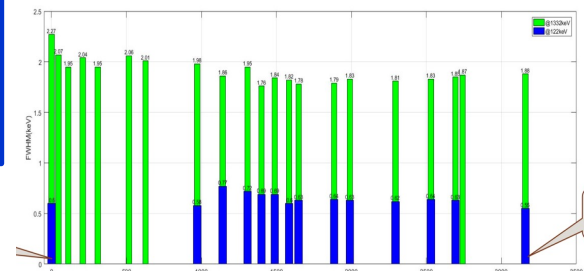


BEGe



ICPC

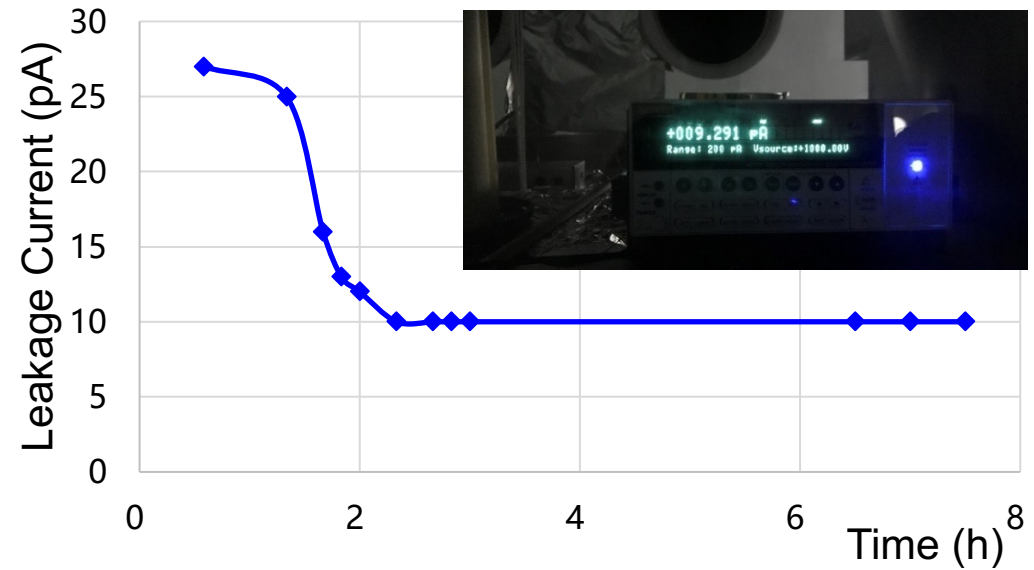
- ✓ Commercial Ge crystal;
- ✓ Structure machining;
- ✓ Li-drift and B-implanted;
- ✓ Home-made ASIC PreAmp;
- ✓ Underground EF-Cu;
- ✓ Underground assemble;
- ✓ Underground testing...



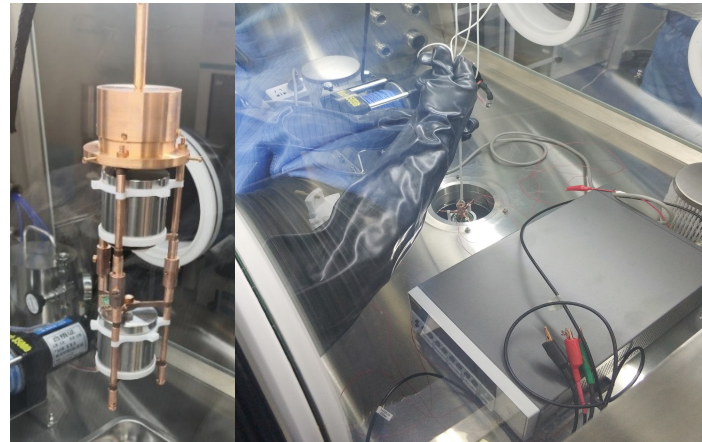
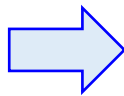
液氮裸浸高纯锗探测器阵列研制

➤ 研制液氮直冷的裸浸高纯锗探测器阵列

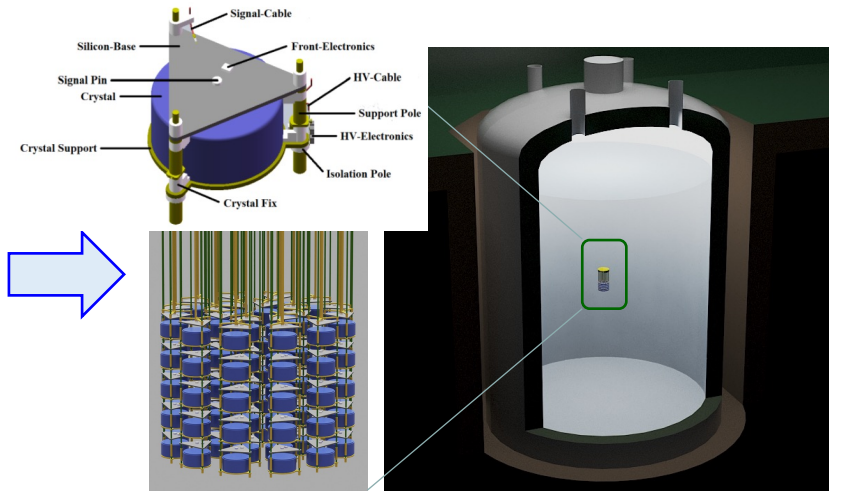
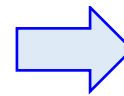
- ✓ 液氮裸浸高纯锗探测器单元设计；
- ✓ 高纯锗探测器串列关键性能研究；
- ✓ 大型液氮环境下高纯锗阵列系统性能测试和稳定运行；



高纯锗单元液氮裸浸测试



高纯锗串列测试

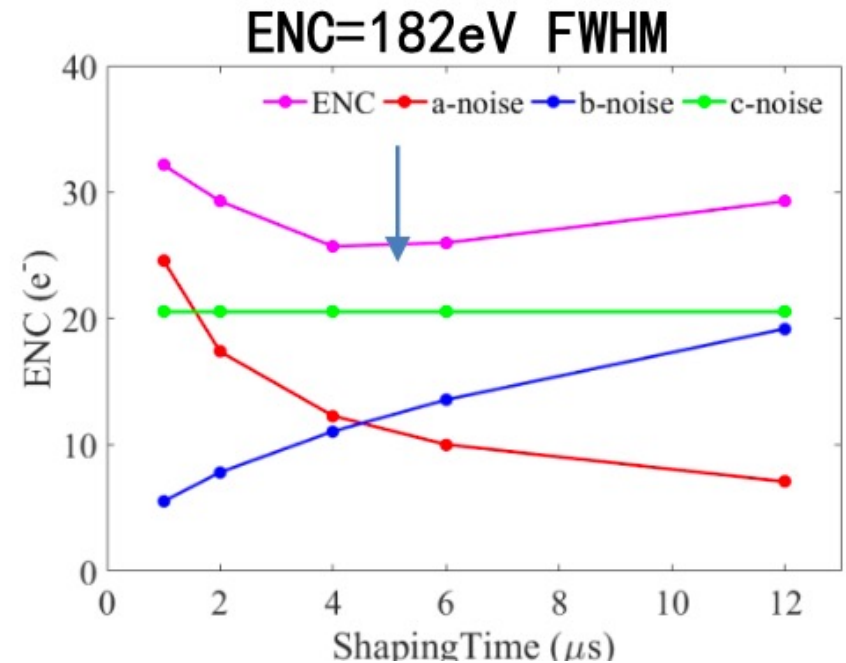
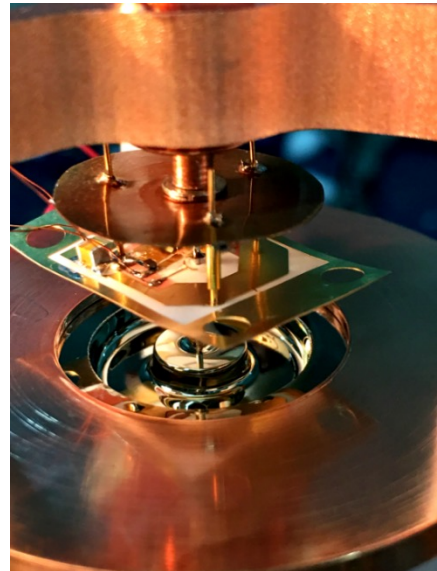
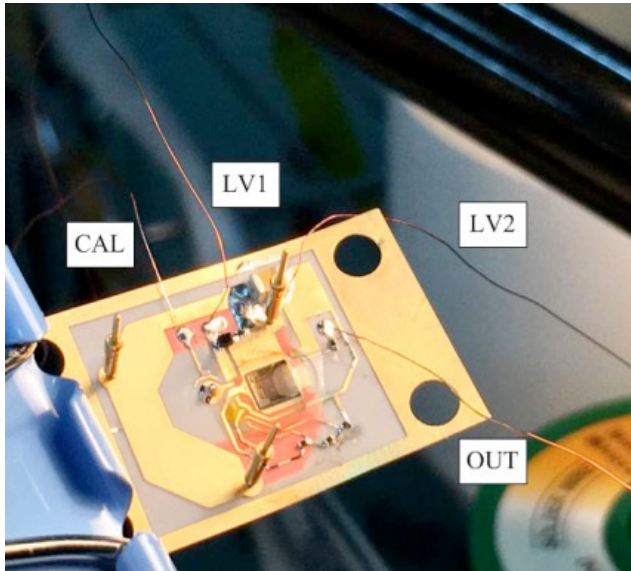


高纯锗阵列设计

低温低本底低噪声前端电子学

- 轻暗物质 → **低噪声**；靠近高纯锗晶体 → **低温/低本底**
- 清华大学2004年开始低温CMOS高纯锗探测器读出ASIC前放技术研究
- ASIC 前放 @ 77K
 - PCB 材料: PTFE(Rogers 4850);
 - ENC ~26e(<200eV) @ 4 μ s shaping time

Details in JINST (2018) 13: 8019

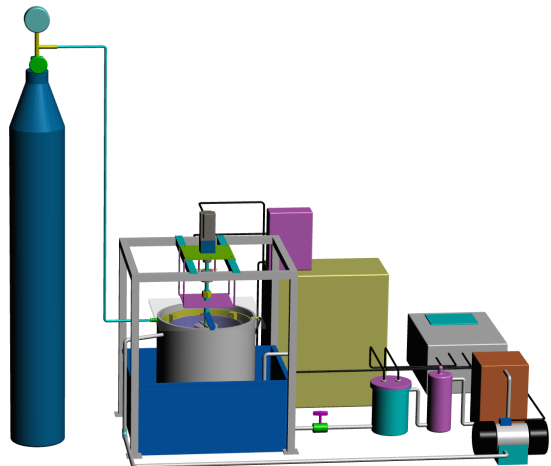


地下电解铜生长

- 地下电解铜生产原型装置
 - 阴极芯棒：316L 不锈钢， $\phi 95 \times 380 \text{mm}$ ；
 - 电镀槽：PE, $\phi 400 \times 500 \text{mm}$ ；
 - 目标：Majorana铜, U/Th : $\sim O(0.1 \mu\text{Bq/kg})$ ；
- 使用ICP-MS做U/Th含量分析



地下电解铜装置@CJPL-I



电解装置



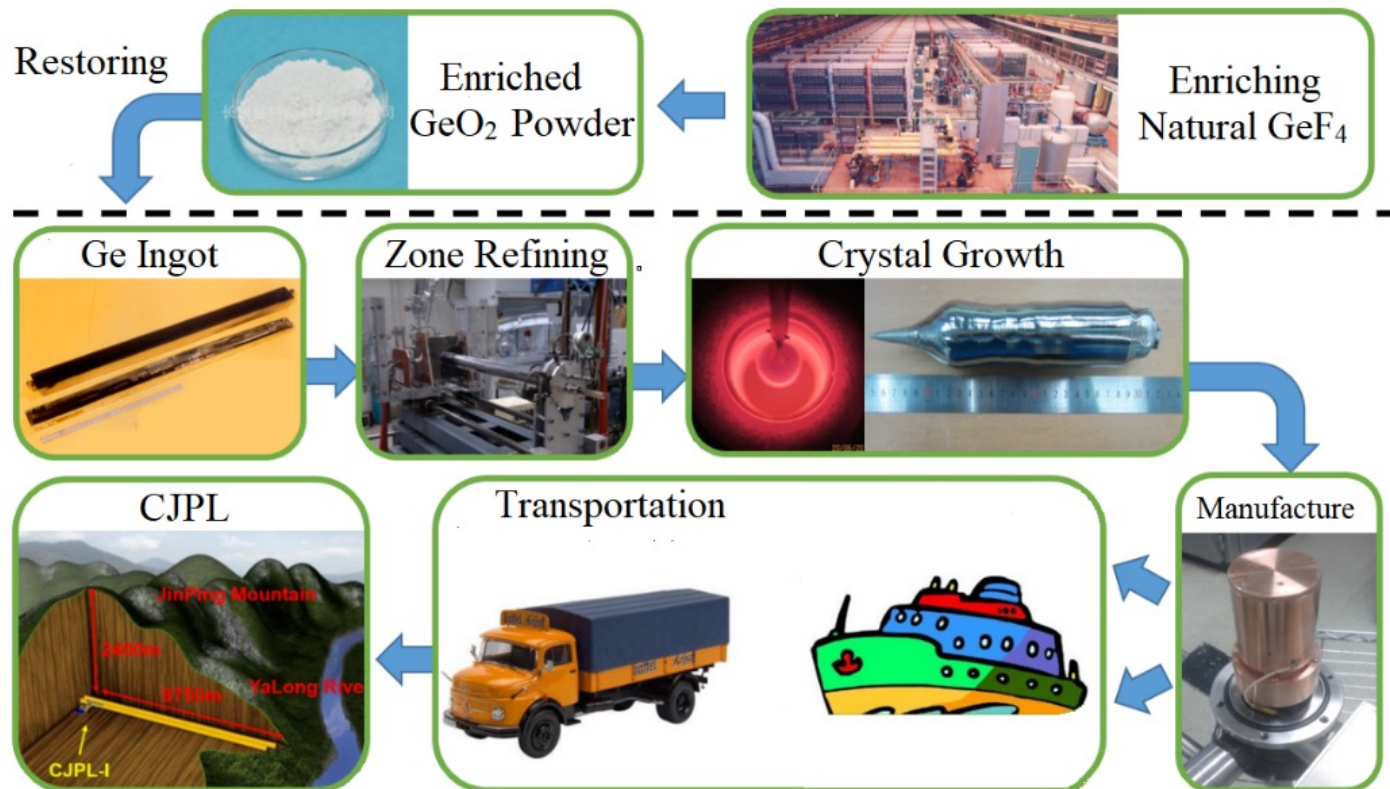
优化电解参数



ICP-MS

锗富集材料及宇生放射性本底控制

- 已获得约200kg ^{76}Ge (>86%)材料，其中100kg来自俄罗斯，100kg来自中国
- 富集锗材料的大规模国产化，为国际大规模富集锗实验作出的重要贡献
- 严格控制锗生产、制备以及运输的时间

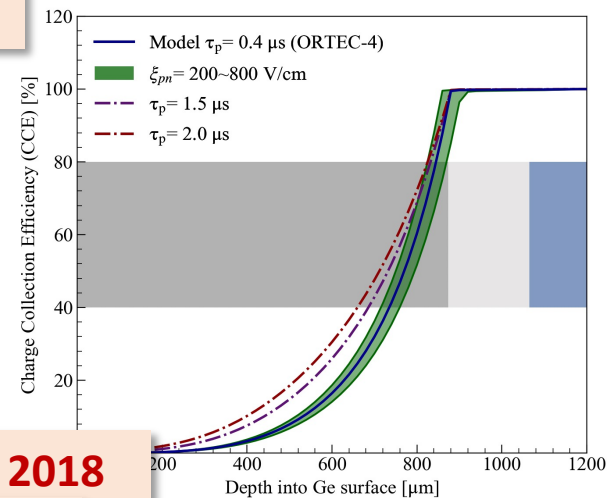


本底抑制算法研究

➤ 高纯锗非活性层电荷收集效率研究;

Appl Radiat Isot., 193, 110638, 2023

□ 基于**第一性原理**的非活性层载流子输运模型, 得到非活性层内电荷收集效率



➤ 基于波形甄别的高纯锗探测器虚拟分区;

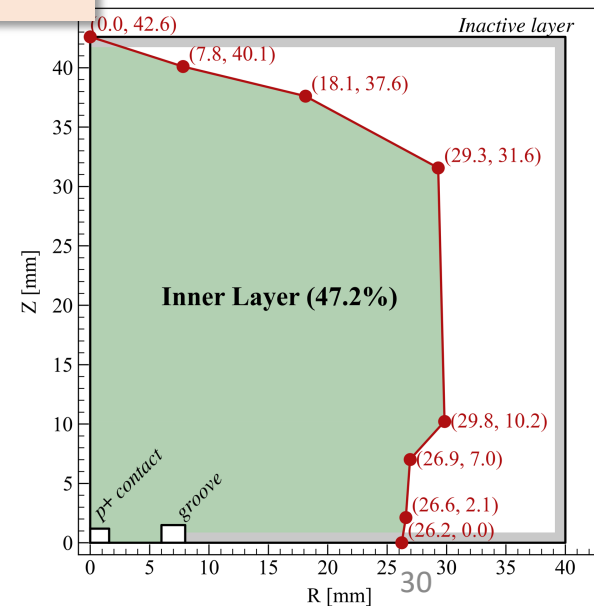
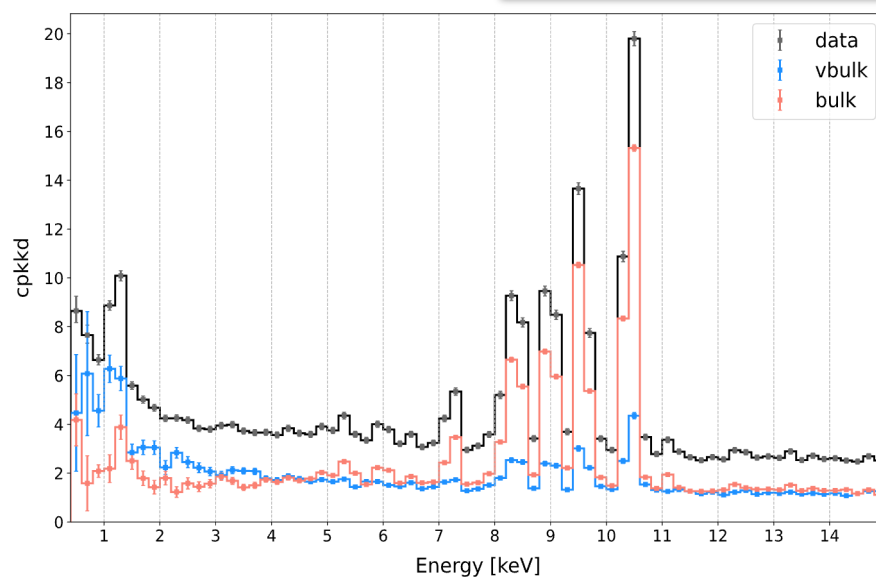
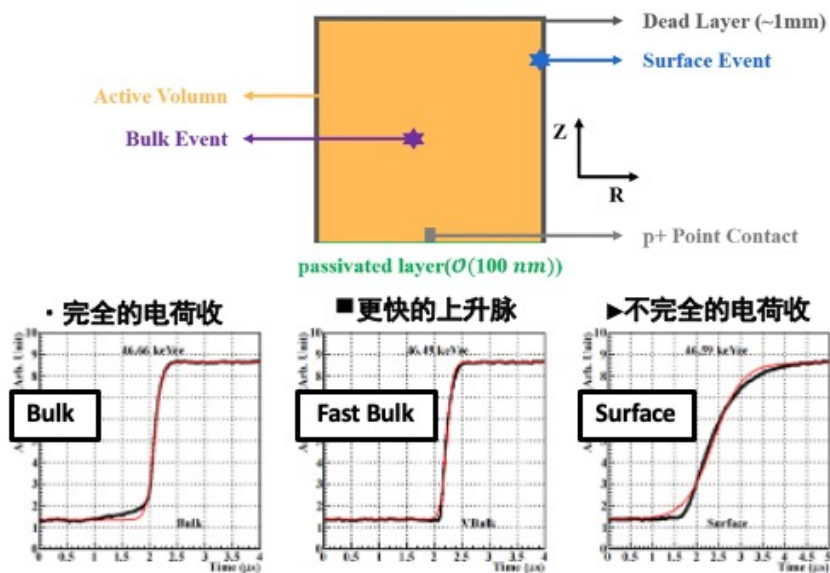
arXiv.2309.03605

• 能量沉积**位置**-(决定)-载流子**漂移路径/时间**-(影响)-**波形上升时间**

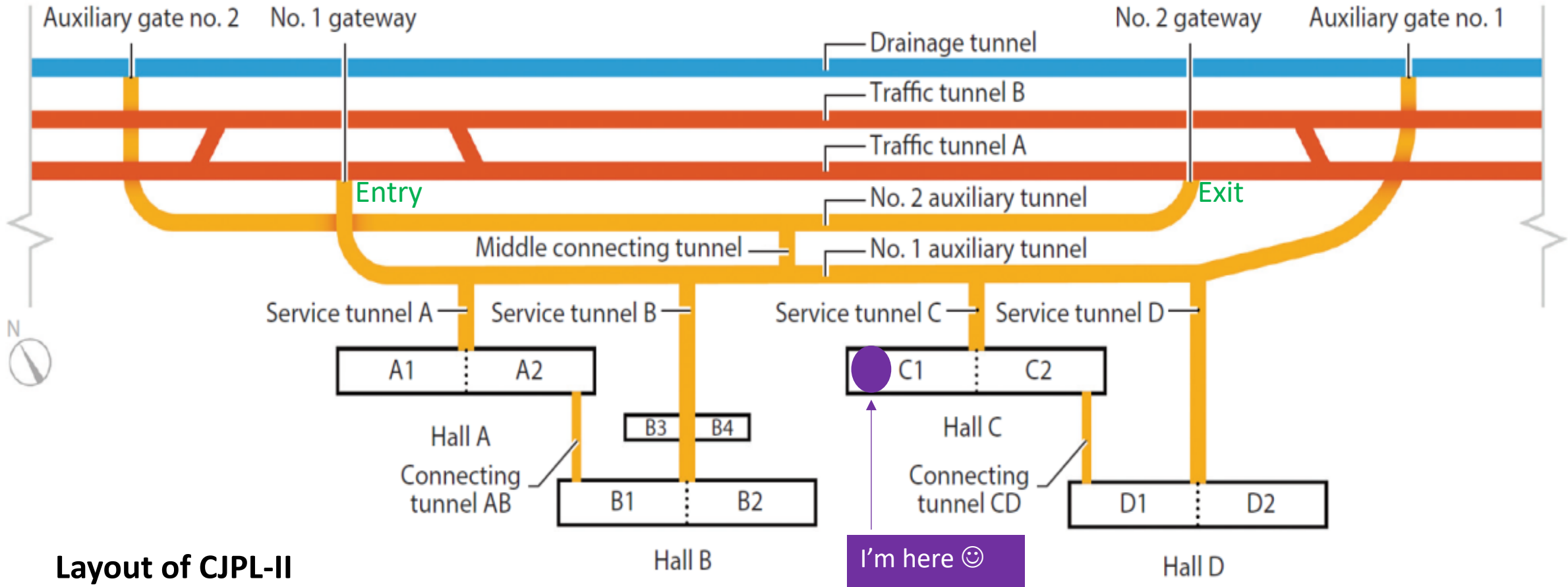
➤ 发展体/表事例, 体事例/超快体事例的甄别方法

NIM-A 886, 13-23, 2018

NST 33:57, 2022



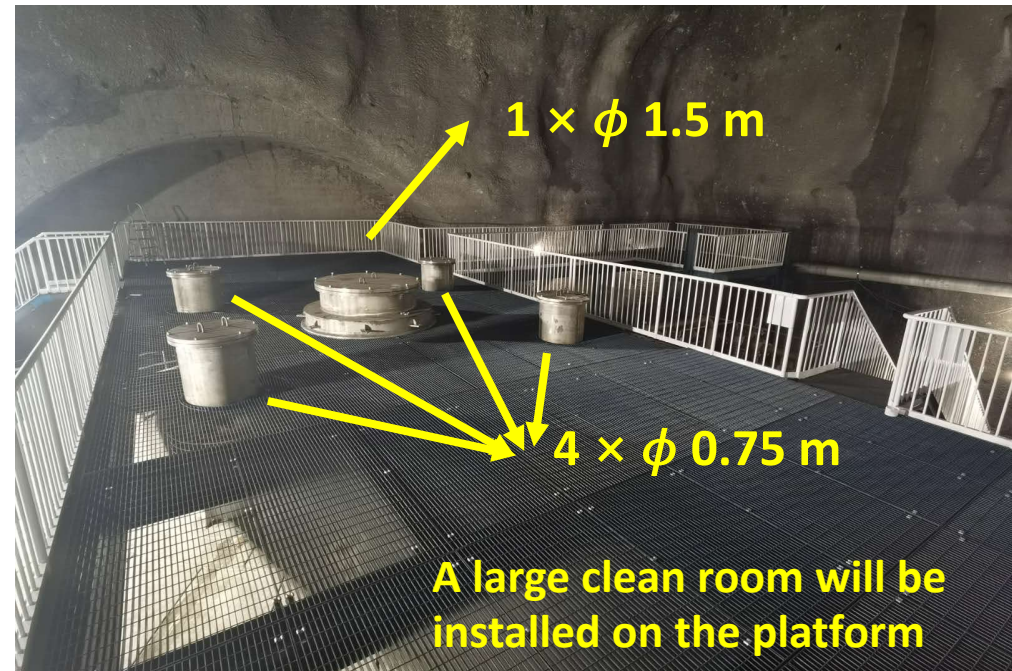
CJPL II —— C1大厅



Layout of CJPL-II
8 main halls (14x14x60m each);

CJPL II —— C1大厅

- 大型液氮罐已于2019年建成
- 钢平台以及液氮罐上部的洁净间将于2024年初完成
- 实验腔安装以及液氮灌注预计在2024年中完成
- 第一批高纯锗阵列今年将放入大型液氮罐中



总结

- CDEX-1和CDEX-10实验取得了一系列国际先进的物理成果，为锦屏二期开展大型液氮直冷的阵列高纯锗实验奠定了基础；
- 利用具有低本底、低阈值特色的CDEX实验数据，开展现有理论框架的实验研究，并推动发展暗物质理论和中微子相关新物理；
- 目前正在建设百公斤级的高纯锗阵列系统，两个前沿物理研究：暗物质+ $0\nu\beta\beta$ ；
- 多项关键技术正在研究，进一步降本底、增质量、降阈值！

谢谢！



中国暗物质实验
China Dark matter EXperiment

<http://cdex.ep.tsinghua.edu.cn/>



中国锦屏地下实验室
China Jinping Underground Laboratory
清华大学·二滩水电开发有限责任公司

<http://cjpl.tsinghua.edu.cn>