



清华大学
Tsinghua University



CDEX无中微子双贝塔衰变实验

岳骞

清华大学

CDEX合作组

2022年10月19日



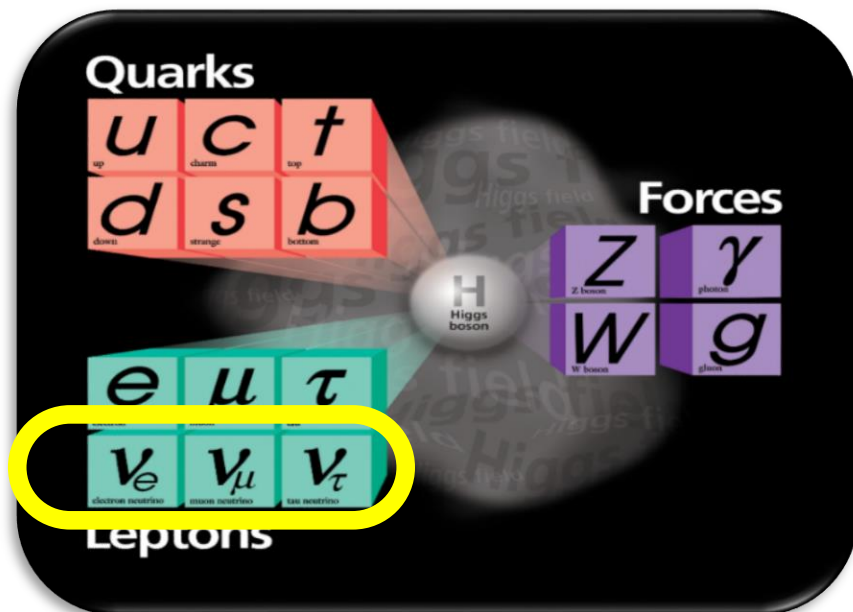
CDEX



内 容

- 科学目标
- CDEX合作组简介
- CDEX 实验的三阶段计划
- CDEX竞争力
- 总结

科学目标



- 中微子振荡实验给出中微子质量不为零的结果，引领超出粒子物理标准模型的新物理研究；
- 中微子性质研究是粒子物理的重要前沿，是国际粒子物理研究的主战场之一，国际竞争激烈。
- 中微子性质研究中一个最要问题之一：中微子是马约拉纳粒子还是狄拉克粒子，即中微子是否是自身反粒子？



Takaaki Kajita



2015

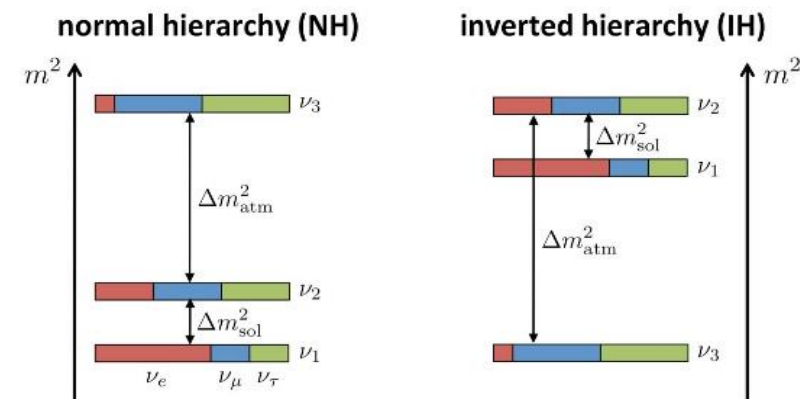
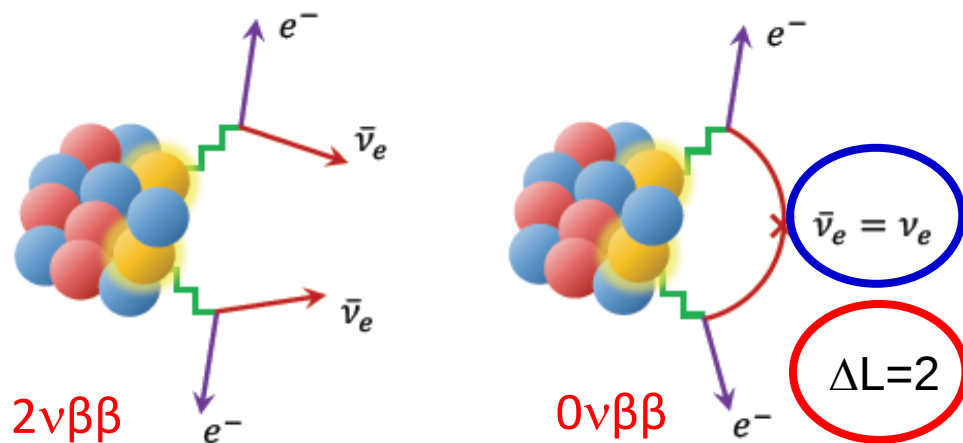
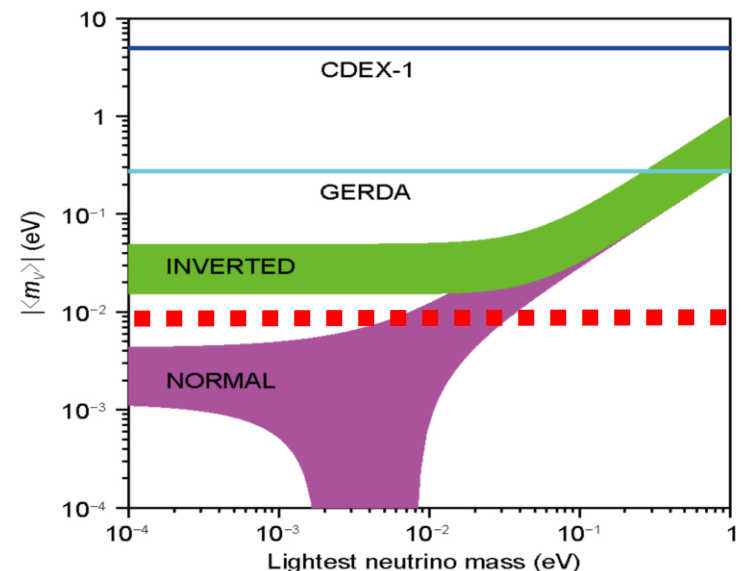


Arthur B. McDonald

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

无中微子双贝塔衰变实验 ($0\nu\beta\beta$)

- $0\nu\beta\beta$: 研究中微子是否是自身反粒子的几乎唯一有效实验途。
- 中微子质量顺序: 灵敏度达到 约10meV, 可以给出中微子质量顺序测量结果。
- 轻子数不守恒: 如果发现 $0\nu\beta\beta$ 信号, 就是实验上测量到了轻子数不守恒过程, 是极其重要的科学成果。



$0\nu\beta\beta$ 实验原理

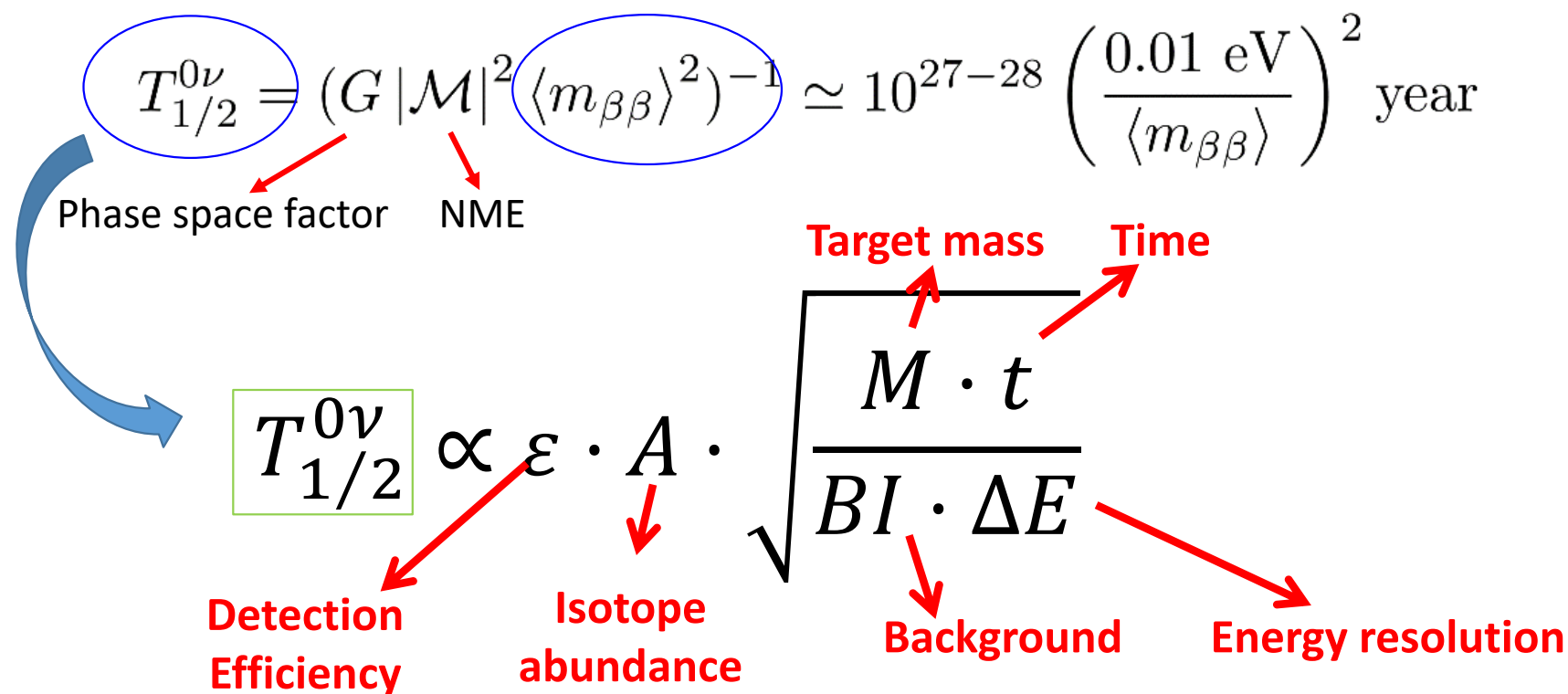
- 实验上可以测量 $T_{1/2}^{0\nu}$, 得到 $m_{\beta\beta}$, 当前实验灵敏度: $m_{\beta\beta} < 100\text{meV}$ 。
- $BI, \Delta E, M, t, A, \varepsilon$ 是 $0\nu\beta\beta$ 实验的重要参数。
- 特征: $Q\beta\beta$ 能点处的能量峰。
- 不同实验技术的结果比较非常重要: 极高灵敏度和极大靶质量。

$$T_{1/2}^{0\nu} = (G |\mathcal{M}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2)^{-1} \simeq 10^{27-28} \left(\frac{0.01 \text{ eV}}{\langle m_{\beta\beta} \rangle} \right)^2 \text{ year}$$

Phase space factor NME

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{\frac{M \cdot t}{BI \cdot \Delta E}}$$

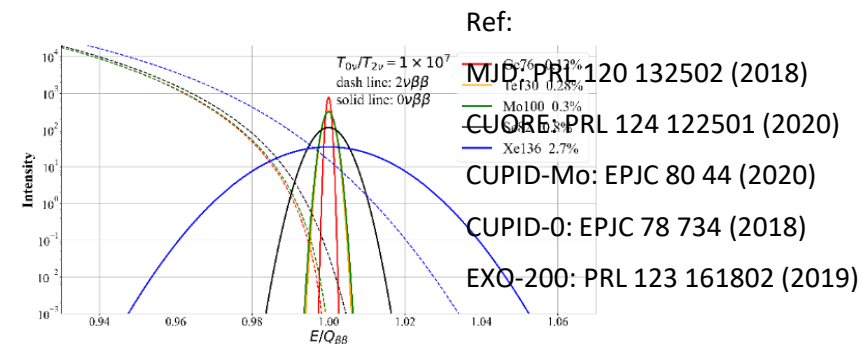
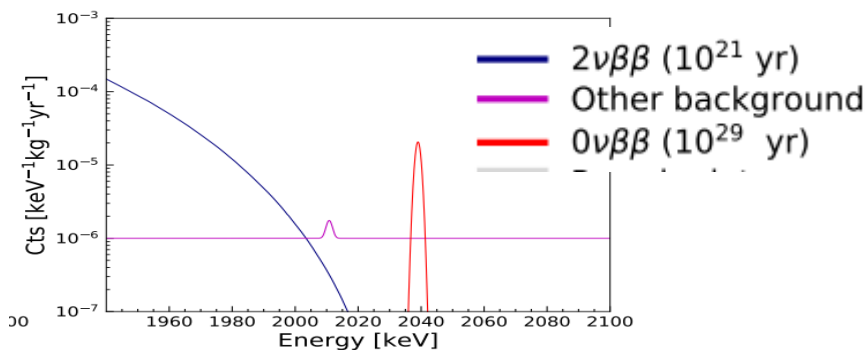
Detection Efficiency Isotope abundance Target mass Time Background Energy resolution



^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验优势

□ 极高的分辨率: $<0.12\%$ FWHM @2039keV:

- ✓ 精确测量 $Q_{\beta\beta}$ 能区的 $0\nu\beta\beta$ 能量峰, 显著的实验标志;
- ✓ $2\nu\beta\beta$ 的本底也不对 $0\nu\beta\beta$ 造成影响;
- ✓ 极窄的能量峰可以有效减少环境本底对于感兴趣能区的本底贡献。



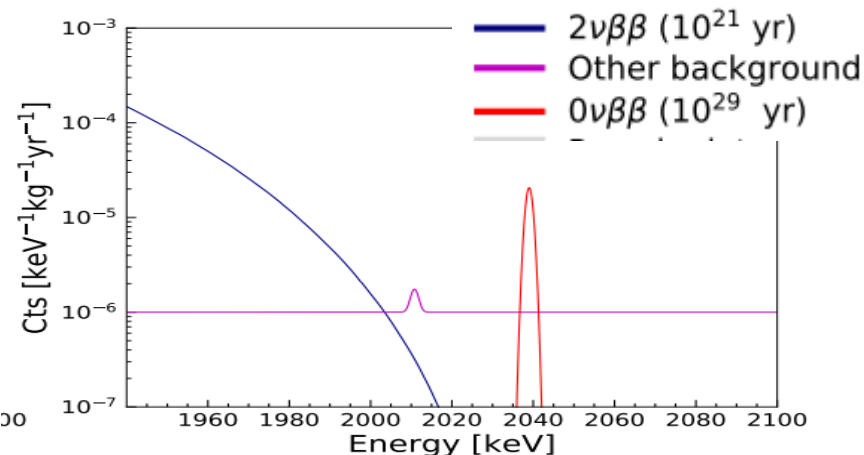
$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{\frac{M \cdot t}{BI \cdot \Delta E}}$$

Diagram illustrating the factors influencing the half-life measurement of ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$:

- $T_{1/2}^{0\nu}$ (Half-life)
- ε (Detection Efficiency)
- A (Isotope abundance)
- M (Target mass)
- t (Time)
- BI (Background)
- ΔE (Energy resolution)

^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 优势

- **高探测效率**: “源”=“靶”，不需要自屏蔽;
- **高纯度晶体**: >12N, **同位素丰度**: >86%;
- **模块化**: 技术上可以逐步扩展到更大质量，实验上可以配置多个探测器模块，也可以多个实验联合开展实验，并且不损失有效靶质量;
- **高纯锗探测技术相对成熟**: 可以工业化生产，提升生产效率。



$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{\frac{M \cdot t}{BI \cdot \Delta E}}$$

Diagram illustrating the factors influencing the sensitivity of the ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ experiment:

- $T_{1/2}^{0\nu}$: Half-life of the $0\nu\beta\beta$ decay.
- ε : Detection Efficiency
- A : Isotope abundance
- M : Target mass
- t : Time
- BI : Background
- ΔE : Energy resolution

国际 $0\nu\beta\beta$ 实验灵敏度

- ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验迄今取得了几项关键技术优势：最好的能量分辨率、最低最好的本底水平(归一到FWHM)、没有 $2\nu 2\beta$ 本底影响。
- HPGe技术：最具竞争力的 $0\nu\beta\beta$ 的实验技术。
- 高纯锗 $0\nu\beta\beta$ 实验是美国能源部评估的所有 $0\nu\beta\beta$ 实验方案中得分最高的技术方案。

Collaboration	Isotope	Target mass	Exposure(kg·y)	Half life (10^{25}y)	$m_{\beta\beta}$ (meV)
GERDA	^{76}Ge	44.2 kg	127.2	> 18	< 79-180
Majorana	^{76}Ge	44.1 kg	26	> 2.7	< 200-433
KamLAND-Zen	^{136}Xe	400 kg -750kg	~970	> 23	< 36-156
EXO-200	^{136}Xe	74.7 kg	234.1	> 3.5	< 93-286
CUORE	^{130}Te	206 kg	372.5	> 3.2	< 90-305
CUPID-Mo	^{100}Mo	4.2 kg	1.17	> 0.15	< 310-540

CDEX $0\nu\beta\beta$ 实验

□ CDEX- $0\nu\beta\beta$: 在CJPL实验室开展三阶段实验计划

- ✓ 三阶段靶质量: 300kg, 1吨, 10T。
- ✓ 实验地点: CJPL C1厅, L65m*W14m*H14m, 底部额外大空间: $\phi 18m * H32m$ 。
- ✓ CJPL岩石覆盖2400m, 显著减小宇宙线通量, 到10吨实验的影响可以忽略。

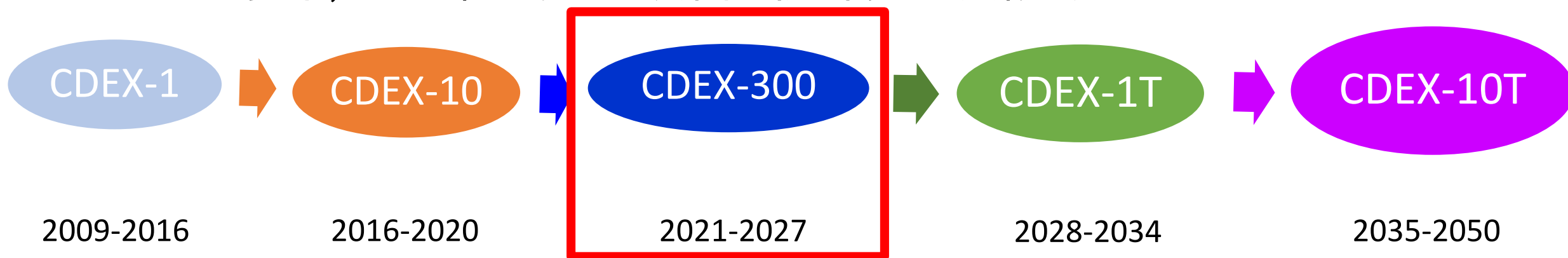
□ 科学目标:

- ✓ 测量 $0\nu\beta\beta$ 过程, 理解中微子是否是自身反粒子、中微子质量顺序等
- ✓ 利用低能区实验数据开展暗物质直接探测、太阳中微子测量等;

CDEX合作组



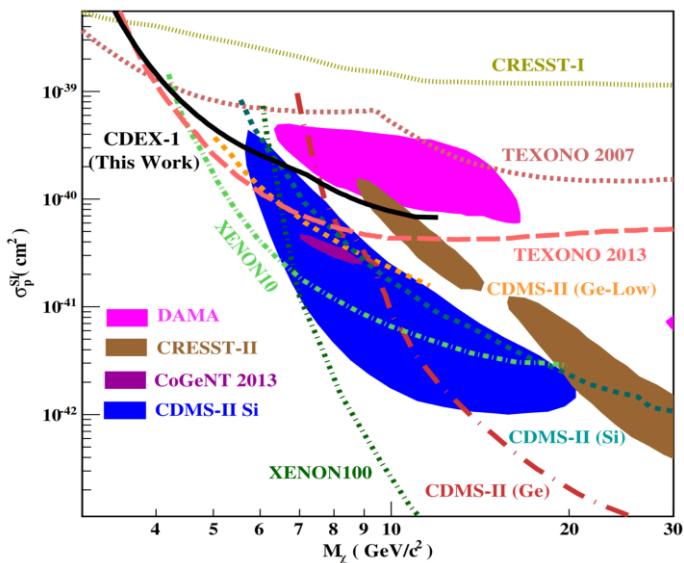
- ❑ 2009年建立，11个大学和研究所，超过100位合作组成员。
- ❑ 科学目标：利用高纯锗开展暗物质和中微子实验研究。
- ❑ 过去十多年，已经取得了一系列国际前沿水平的研究成果。



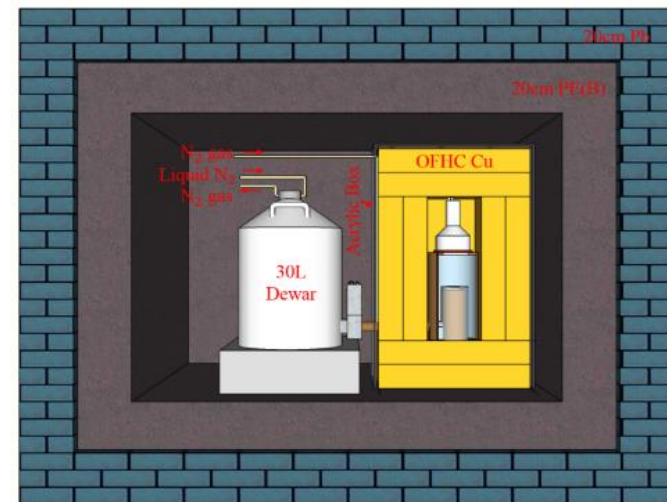
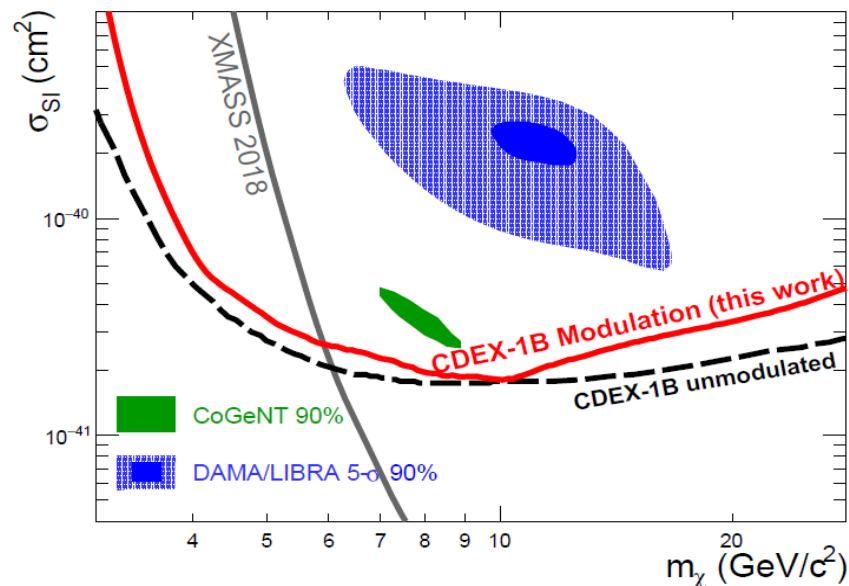
CDEX-1 实验

- 2011年建立CDEX-1kg实验系统。
- 2013年发表我国第一个暗物质直接探测实验结果。
- 2019年利用超过连续四年的实验数据发表国际最好的年度调制效应实验结果。

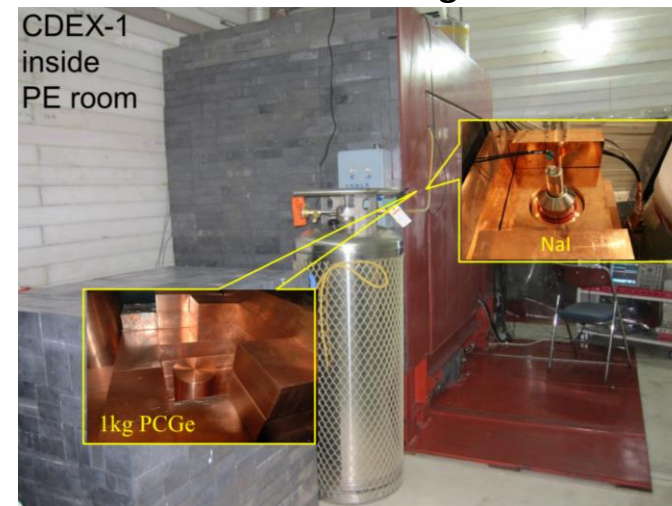
PRD 88, 052004(2013)



PRL 123:221301 (2019)



CDEX-1A&B: 1kg PPC Ge $\times$ 2



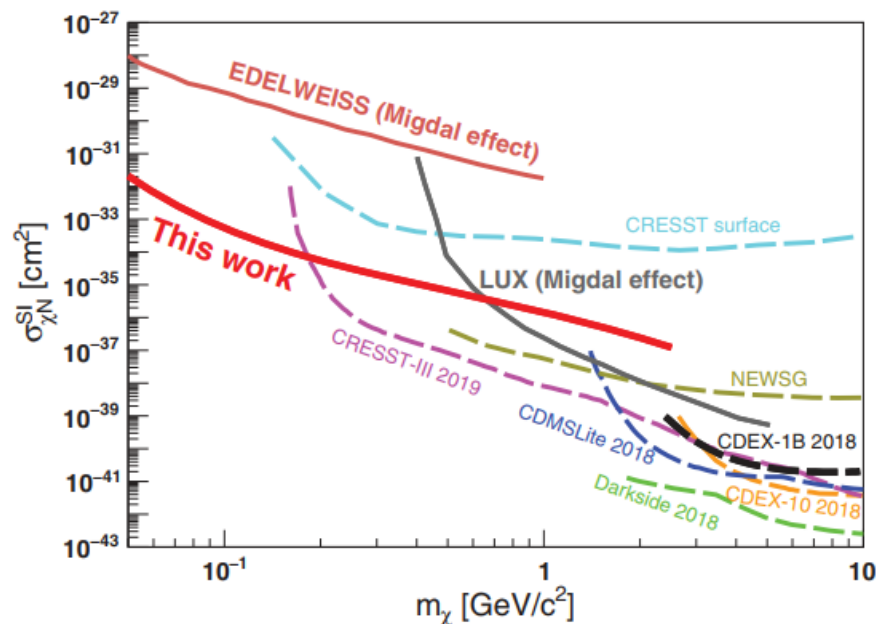


CDEX

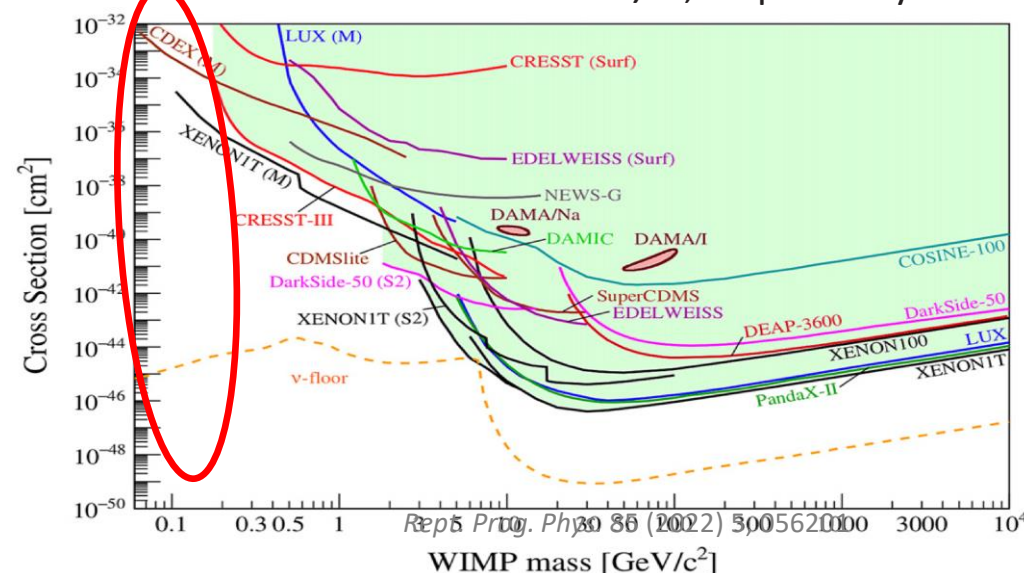
基于Migdal效应的暗物质研究

- 基于Migdal效应，CDEX把暗物质探测下限下推到50MeV，并给出了50-180MeV能区国际最好的实验灵敏度。
- 实验结果在 European Astroparticle Physics Strategy 2017-2026中引用。

PRL 123, 161301 (2019)

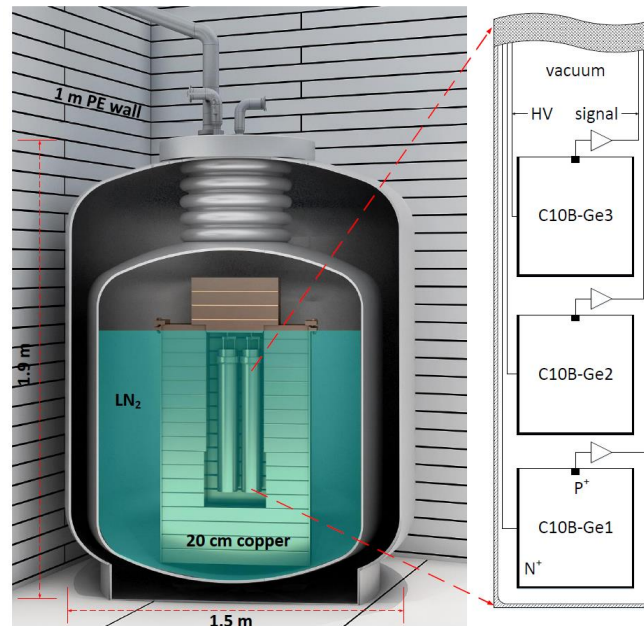


Several results using this effect were already published with the **strongest ones being from** XENON1T and CDEX above and below 110 MeV/c^2 , respectively.

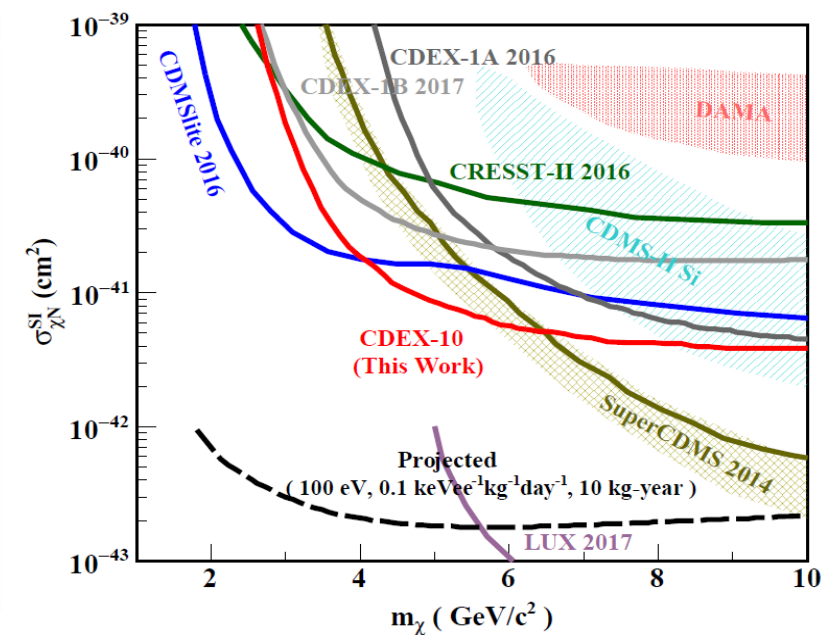


CDEX-10暗物质研究

- 从CDEX-1到CDEX-10：通过阵列化升级探测器规模，提升实验灵敏度。
- 2018年，CDEX-10发表了4-5GeV当时国际最好实验灵敏度。



PRL 120, 241301 (2018)



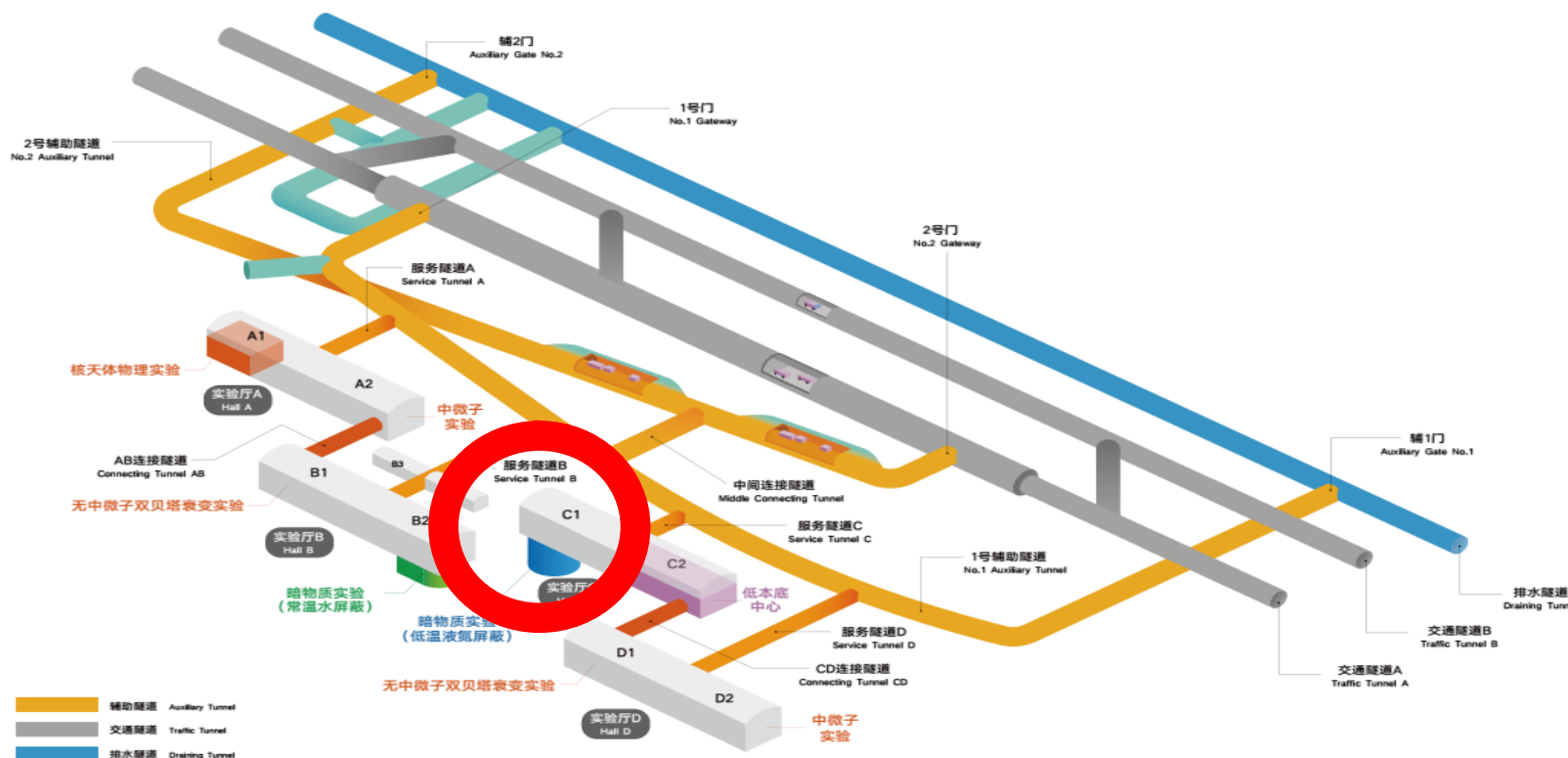
Physics Channels	Detectors	Threshold (eV)	Exposure (kg·d)	Publications
Chi-N SI	CDEX-1A	400	14.6	PRD 88, 052004, 2013
Chi-N SI	CDEX-20g	177	0.784	PRD 90, 032003, 2014
Chi-N SI	CDEX-1A	475	53.9	PRD 90, 091701, 2014
Chi-N SI/SD	CDEX-1A	475	335.6	PRD 93, 092003, 2016
Axion	CDEX-1A	475	335.6	PRD 95, 052006, 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	Sci. China 64, 281011, 2021
Earth Shielding	CDEX-10	160	102.8	PRD 105, 052005, 2022
CR boosted DM	CDEX-10	160	205.4	PRD 106, 052008, 2022
Chi-e	CDEX-10	160	205.4	arXiv: 2206.04128
$0\nu\beta\beta$	BEGe	—	186.4	PRD 106, 032012, 2022

CDEX-300 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验

□ CDEX-300目前正在CJPL-C1厅建设:

---实验空间: $L65\text{m} \times W14\text{m} \times H14\text{m}$, 局部空间: $\phi 18\text{m} \times D18\text{m}$

□ 经费: 3亿元 (前期累计投入约2亿,, 未来2-3年需要额外1亿)。

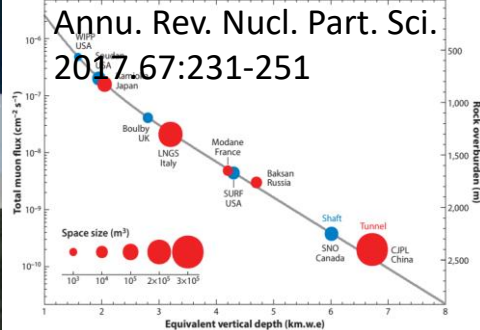


国家重大科技基础设施

极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施



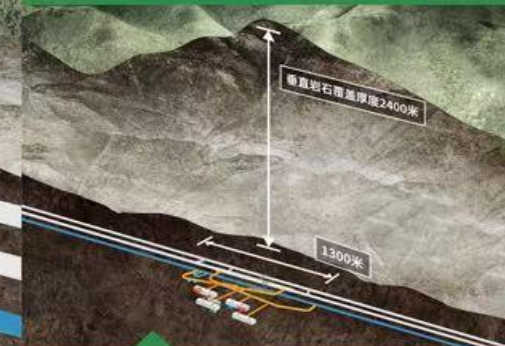
中国锦屏地下实验室
China Jinping Underground Laboratory



Jinping Tunnel in China



CDEX-300 Cooling System



CJPL with normal scale

Rock overburden
2400m

距离西出口9km

距离东出口9km

排水隧道
Draining Tunnel

2号辅助隧道
No.2 Auxiliary Tunnel

辅助隧道
Auxiliary Tunnel

1号门
No.1 Gateway

2号门
No.2 Gateway

交通隧道B
Traffic Tunnel B

交通隧道A
Traffic Tunnel A

本物理实验

实验厅A
Hall A

A2

中微子实验

B1

B2

实验厅B
Hall B

子双贝塔衰变实验

暗物质实验 (常温水屏蔽)

实验厅C
Hall C

C1

C2

暗物质实验 (低温液氮屏蔽)

无中微子双贝塔衰变实验

实验厅D
Hall D

D2

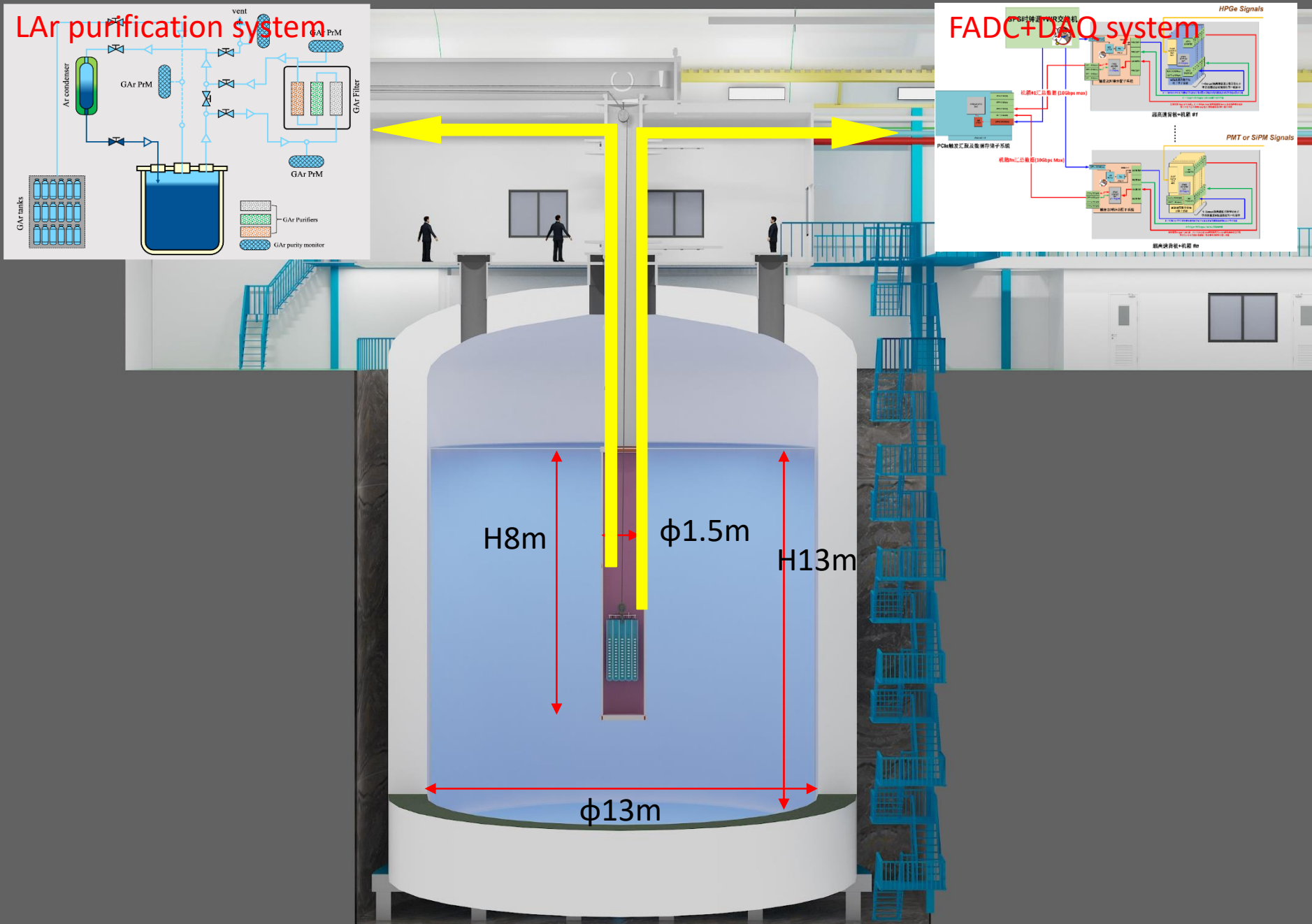
中微子实验

1号辅助隧道
No.1 Auxiliary Tunnel

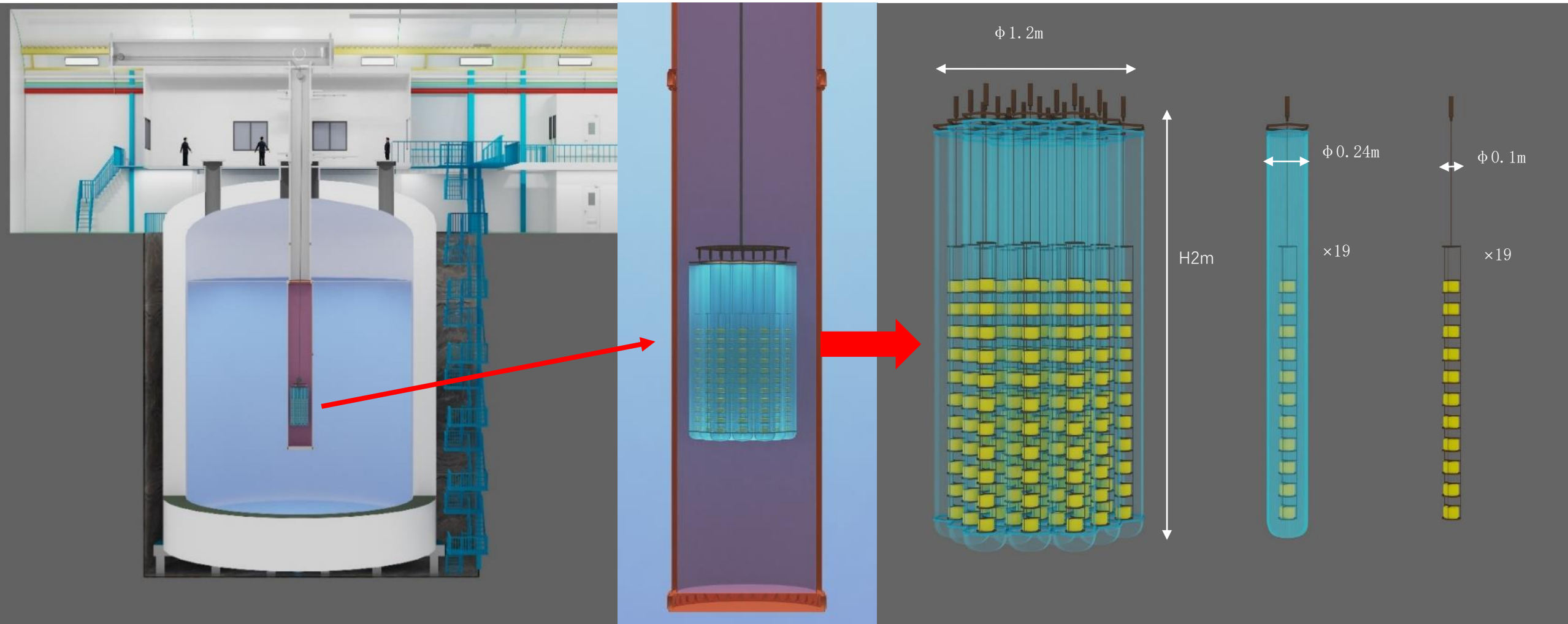


CDEX-300

- ❑ $\sim 300\text{kg } ^{76}\text{Ge}$
- ❑ BEGe + ASIC + Silicon Substrate
- ❑ 20T LAr屏蔽和反符合
- ❑ 1725m^3 液氮低温屏蔽系统
- ❑ 顶部和侧面400-500 m^2 实验室



CDEX-300 ^{76}Ge 探测器阵列



1725 m³ Liquid Nitrogen

LAr tube

Enriched Ge array

CDEX-300 本底模拟

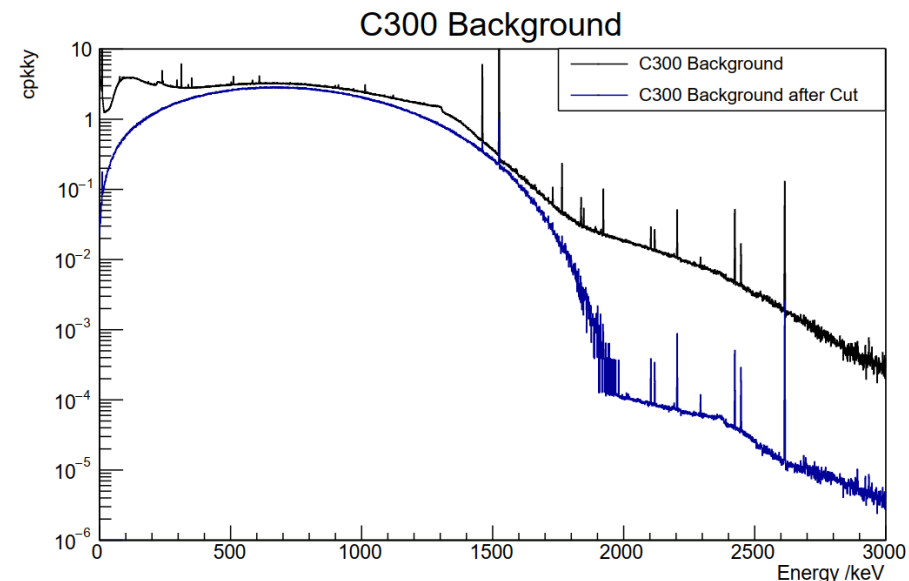
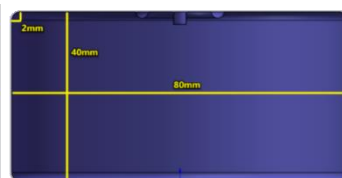
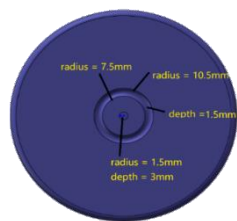
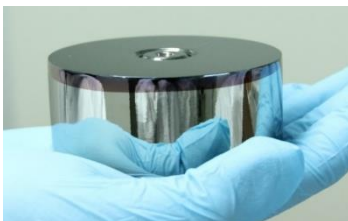


CDEX

❑ 探测器类型: BEGe, 单体质量约1kg, 尺度: $\phi 80\text{mm} \times H40\text{mm}$ 。

❑ 能量分辨率: 0.12% FWHM@2.039MeV.

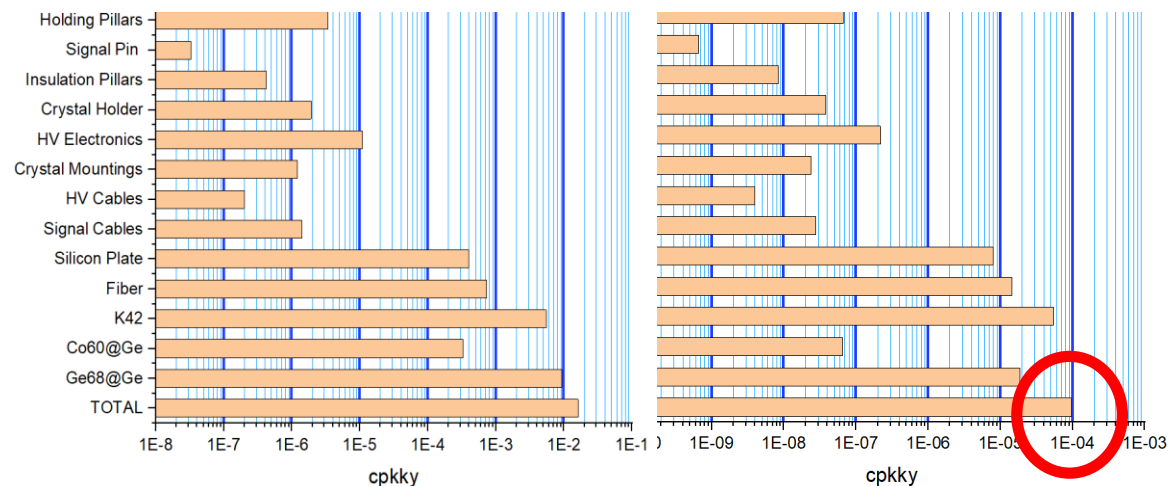
❑ 本底水平: 1×10^{-4} cpkky @ $Q_{\beta\beta}=2.039\text{MeV}$ (CJPL, ASIC,)



Background sources

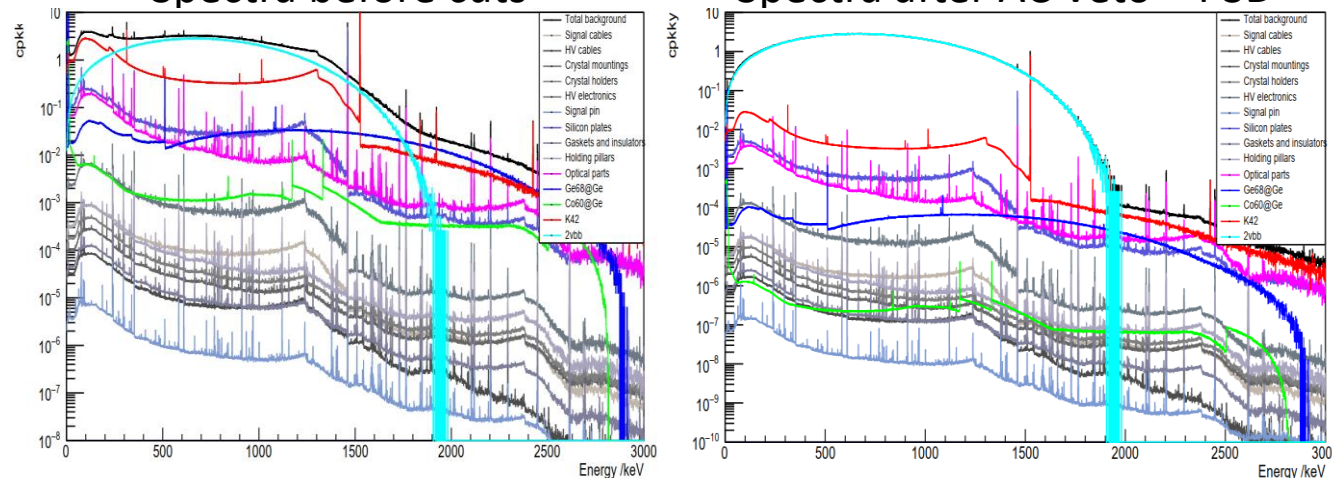
before cuts

after AC Veto + PSD



Spectra before cuts

Spectra after AC Veto + PSD



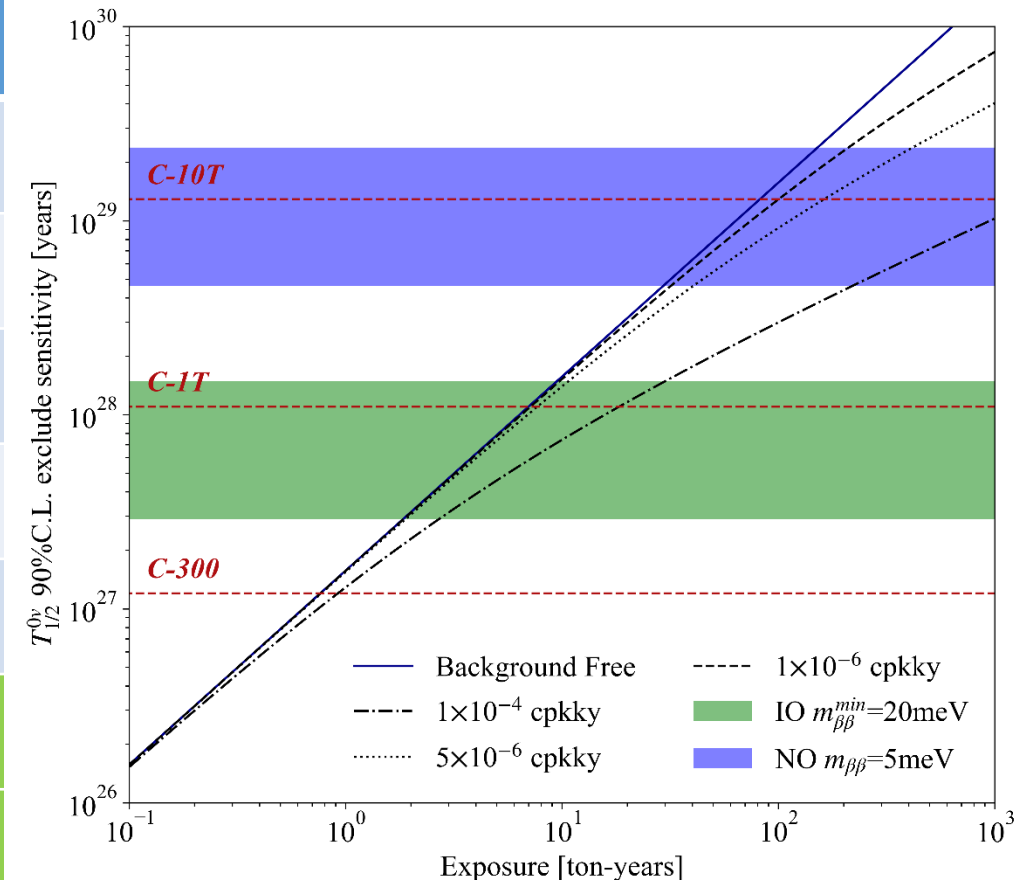
CDEX-300计划



□ 建设时间: 2021-2026,; 运行时间: 2027-2031 (5 years)

□ 曝光量: **>1t·y**; 半衰期灵敏度: **$T_{1/2} > 10^{27}y$** .

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
$T_{1/2}$	$>1 \times 10^{27}y$
$m_{\beta\beta}$	28.5~68.0 meV



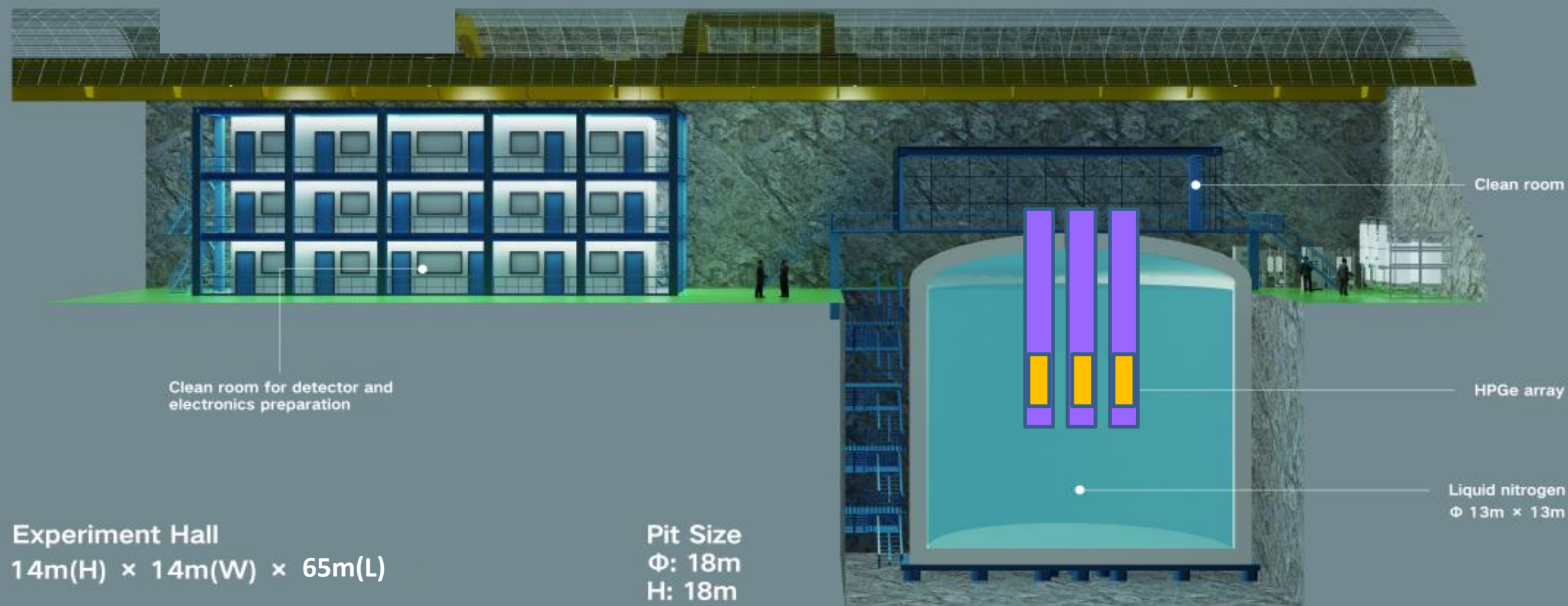
CDEX-1T and CDEX-10T Conceptual Layout



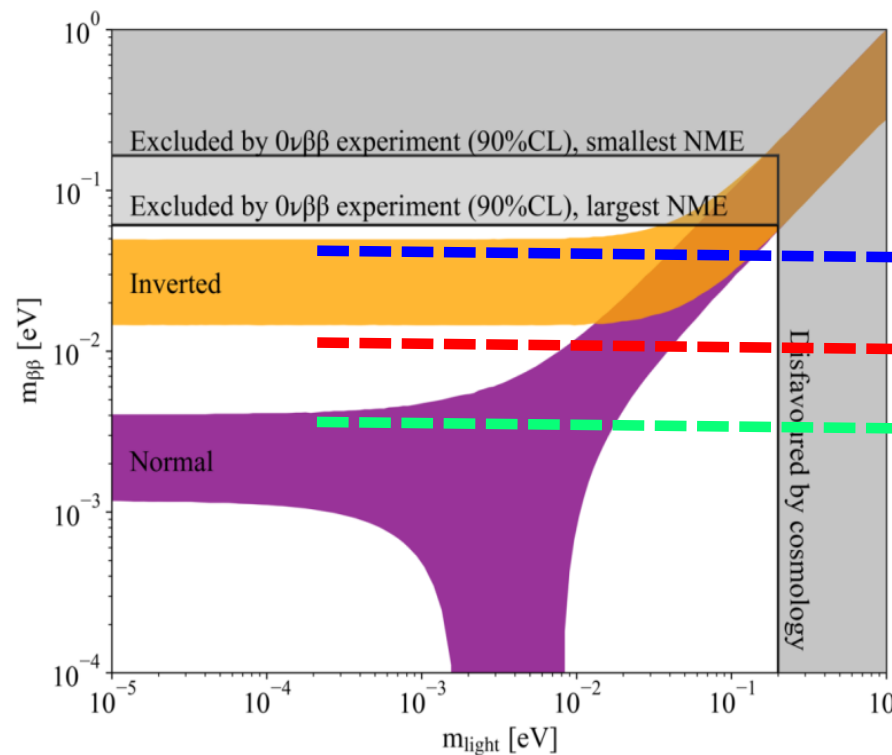
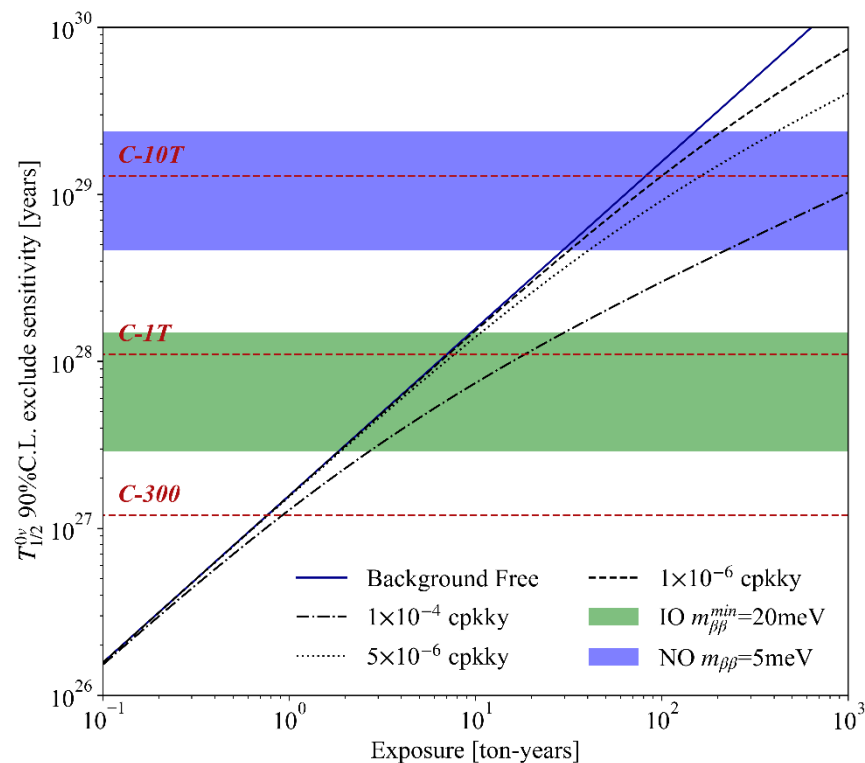
中国暗物质实验
China Dark matter EXperiment



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



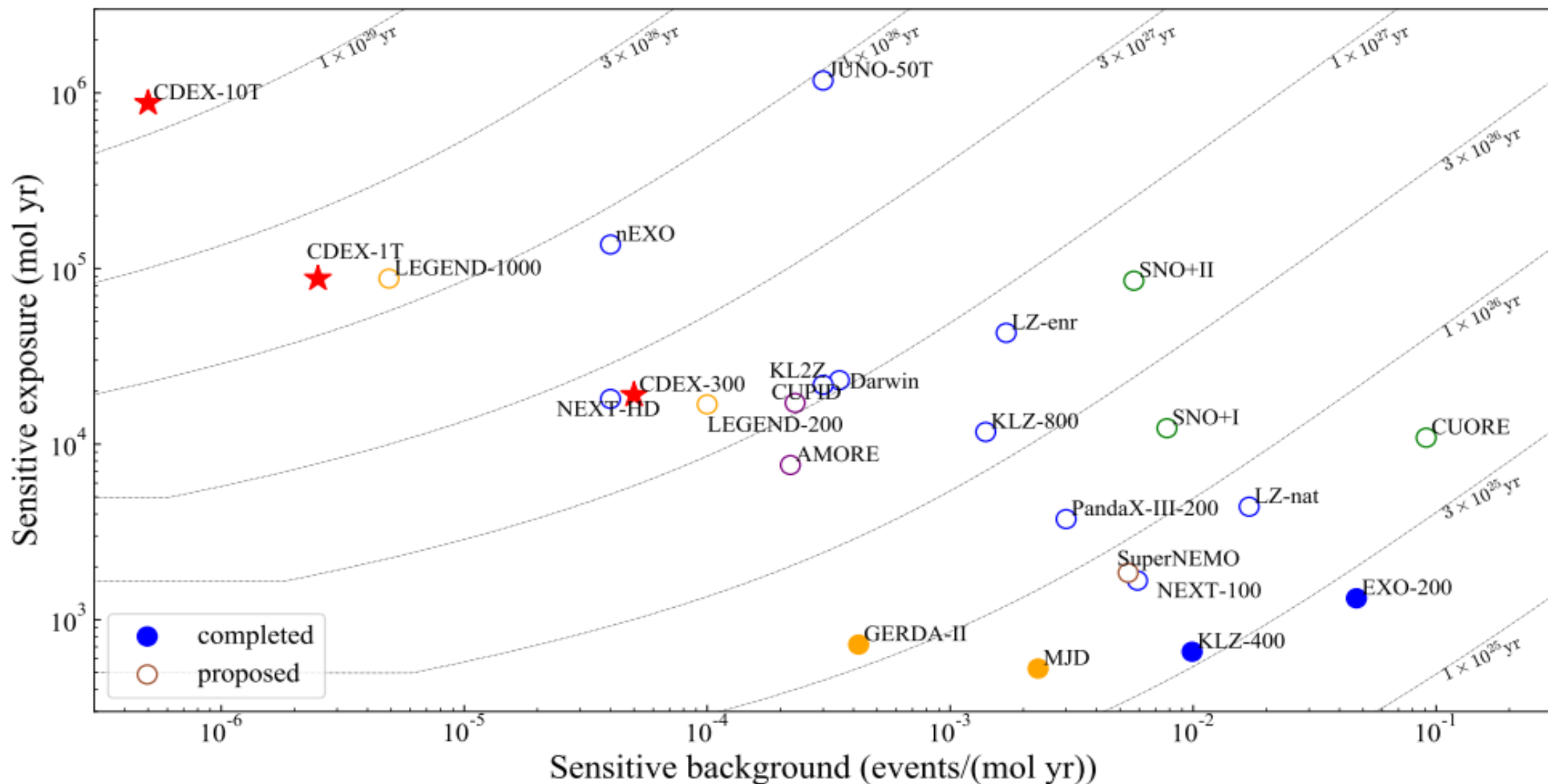
CDEX-1T and CDEX-10T物理目标



CDEX-1T: $m_{\beta\beta} < [11.6 \sim 26.4] \text{ meV}$

CDEX-10T: $m_{\beta\beta} < [2.9 \sim 6.7] \text{ meV}$

国际 $0\nu\beta\beta$ 实验结果和预期目标



CDEX 实验关键参数、物理结果和预算



- ❑ CDEX-300 → CDEX-1T: 地下氦、材料纯化、减少地面材料准备时间。
- ❑ CDEX-1T → CDEX-10T: 密封锗单元或固氦、地下生长高纯锗晶体和制备探测器。

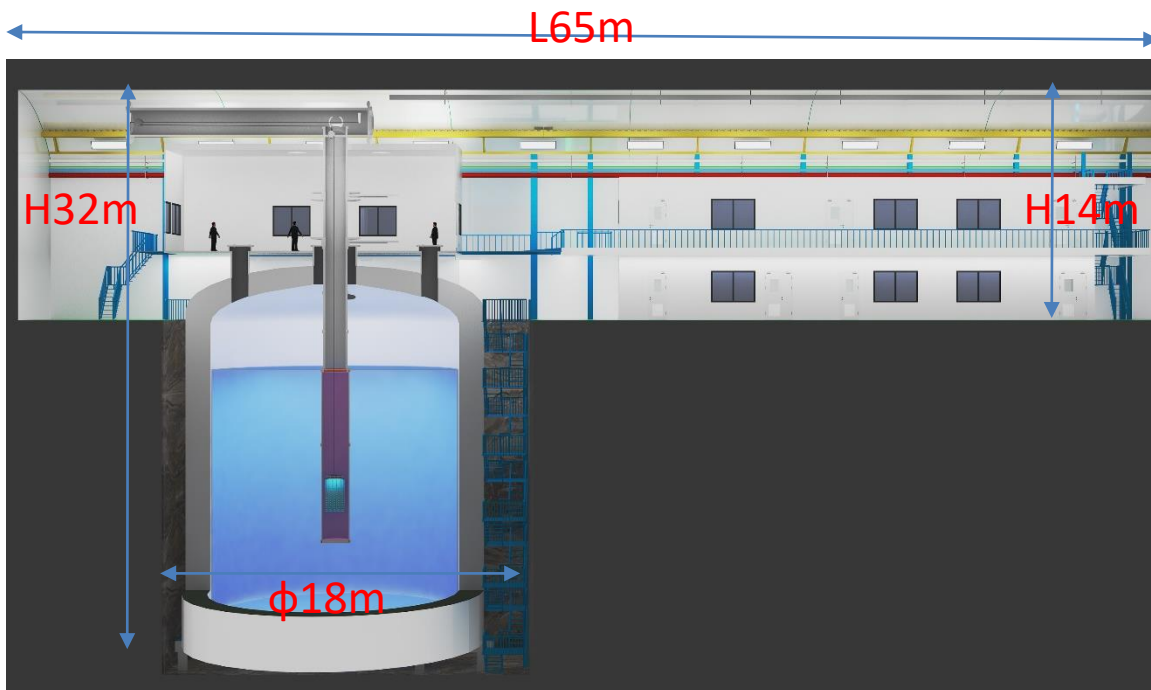
Parameter	CDEX-300	CDEX-1T	CDEX-10T
^{76}Ge mass	225 kg	1000 kg	10000 kg
BI@2039keV	10^{-4} cpkky	5×10^{-6} cpkky (20 times lower)	1×10^{-6} cpkky (5 times lower)
Run time	Construction 5y (2021-2027) Run 5y (2027-2031)	Construction 5y (2028-2034) Run 5y (2035-2039)	Construction 5y (2035-2039) Run 10y (2040-2050)
Exposure	>1 t·y	5 t·y	100 t·y
$T_{1/2}$	$>1.0 \times 10^{27}\text{y}$	$>1.0 \times 10^{28}\text{y}$	$>1.0 \times 10^{29}\text{y}$
$m_{\beta\beta}$	<[28.5~68.0] meV	<[11.6~26.4] meV	<[2.9~6.7] meV
Budget	~RMB 3亿	~RMB 10亿 (包括CDEX-300)	~RMB 65亿

CDEX的国际竞争优势

- CJPL强有力的支持
- 高纯锗关键技术
- 大规模实验的材料批量化生产能力
- 国际合作
- “数”说CDEX对国际 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验的独特贡献

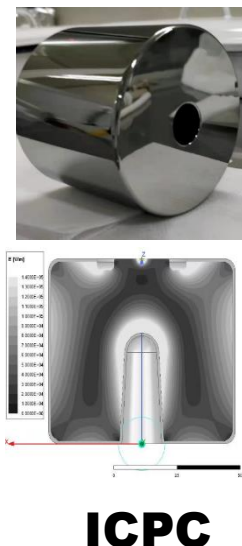
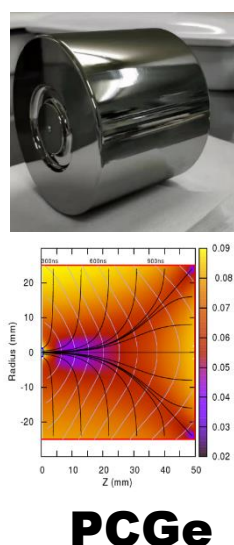
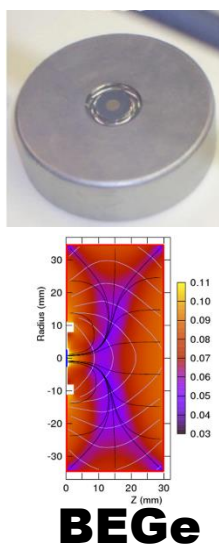
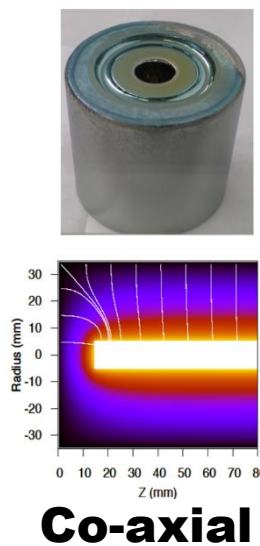
CJPL实验支持

- ❑ CDEX-C1厅： L65m*W14m*H14m，隧道底部大型地坑 $\phi 18\text{m}$ ，深18m，形成局部大型地下空间： $\phi 18\text{m}*\text{H}32\text{m}$ ；
- ❑ 全面的技术支持和后勤保障。

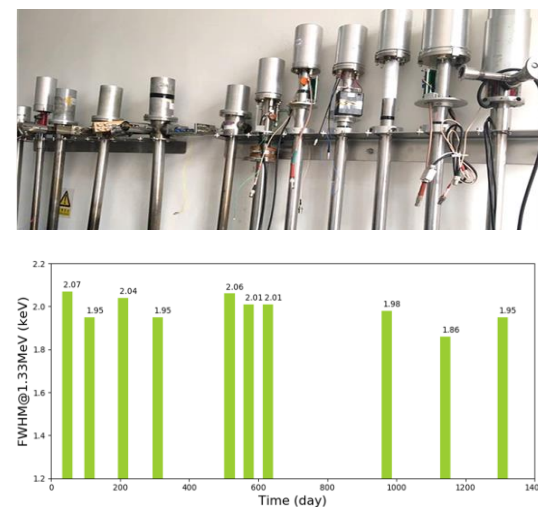


高纯锗技术—锗探测器制备

- ❑ CDEX合作组自主研发了多种高纯锗探测器，可以用于 $0\nu\beta\beta$ 实验。
- ❑ 探测器性能比拟商业化产品，并且实现了产品化和商业销售。



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



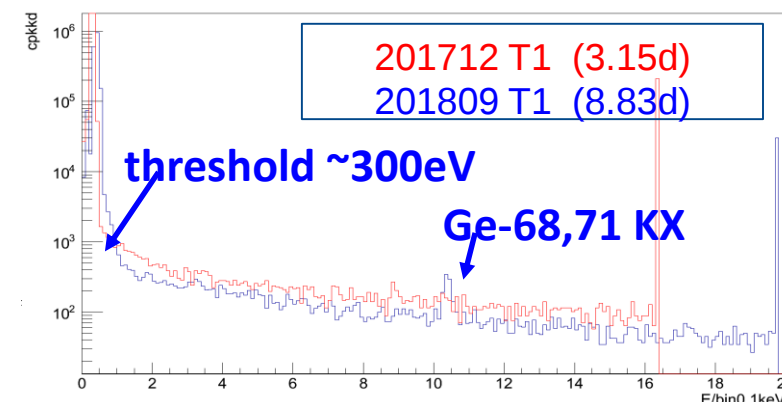
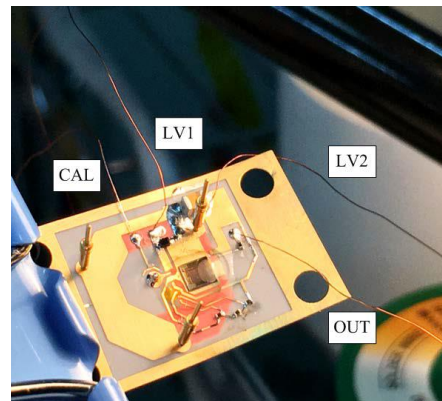
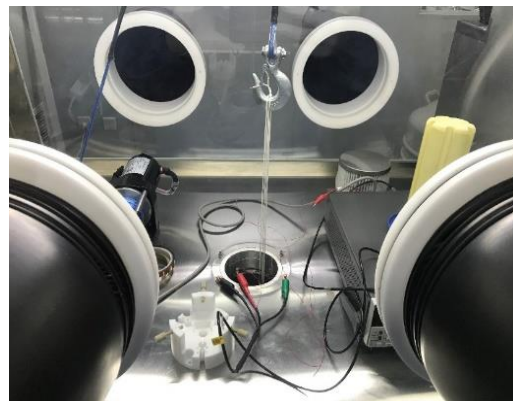
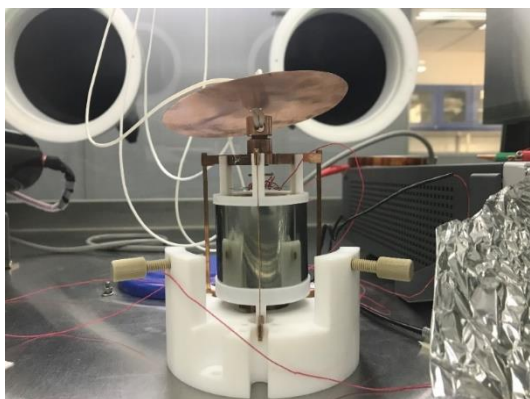
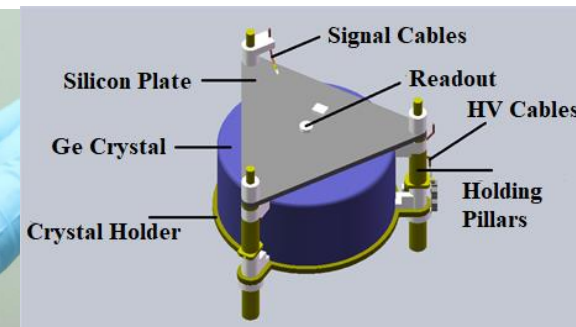
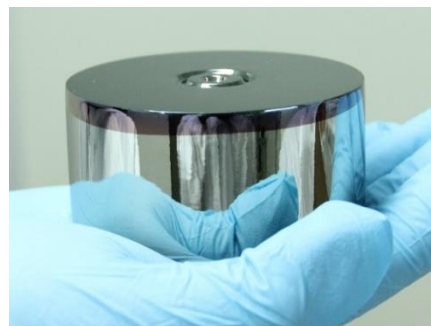
高纯锗技术---ASIC前端电子学



□ 世界第一个点电极高纯锗+CMOS ASIC探测器，完成液氮浸泡测试。

自主研制500g Ge + CMOS ASIC preamp + LN₂

□ 性能良好，本底优异。



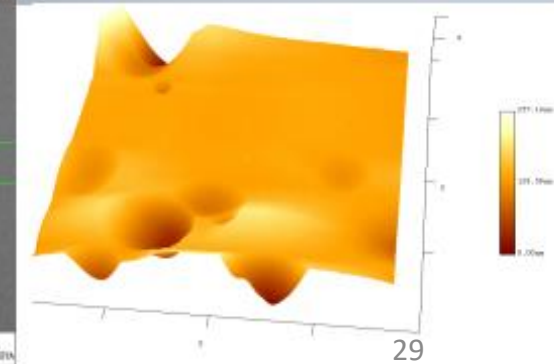
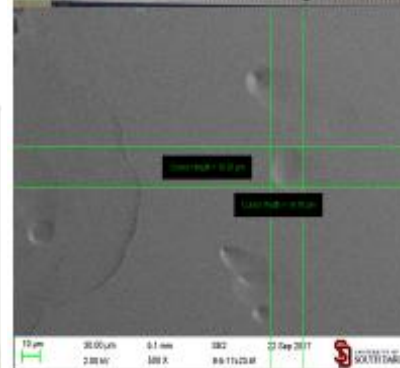
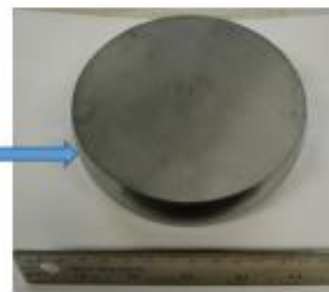
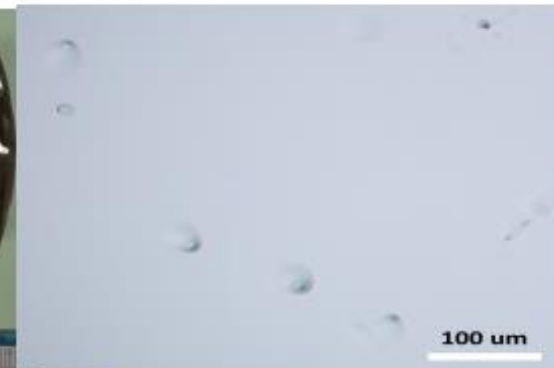
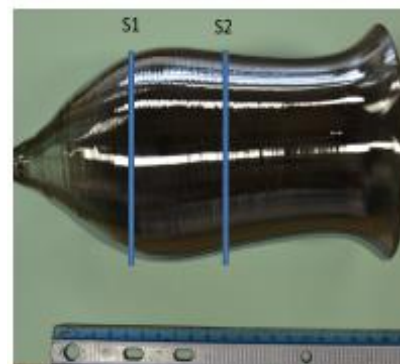
Fabricated and Tested in CJPL-I

ASIC PreAMP

Background spectrum @CJPL 28

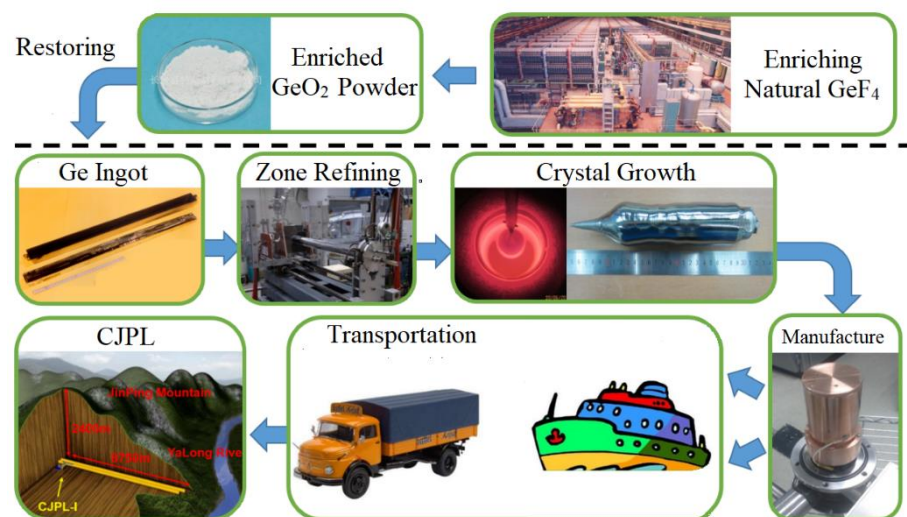
高纯锗技术---锗晶体生长

- CDEX合作组长期推进高纯锗晶体生长，进展良好。
- 已获经费支持，开展地下实验室晶体生长和探测器制备工作。



高纯锗技术—富集锗材料供应

- CDEX已经获得200kg ^{76}Ge (>86%)材料，100kg来自俄罗斯，100kg来自中国，是目前最大量的 $^{76}\text{GeO}_2$ 材料。
- 富集锗材料的大规模国产化，是CDEX合作组为国际大规模富集锗实验做出的重要贡献。



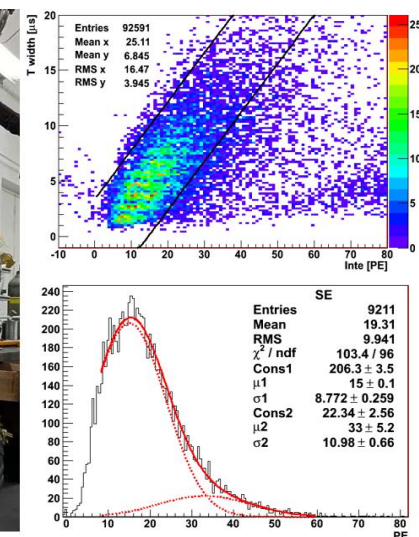
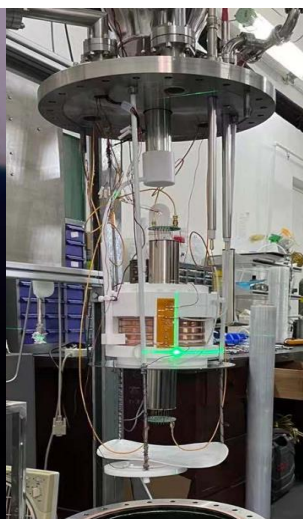
其他关键技术

- 地下电解铜获得低宇生本底的高纯度铜材料；
- 开展液氙/固氙反符合技术研究；
- SAGE:高纯锗本底和波形模拟软件包。

SAGE, 2021 JINST 16 T09005



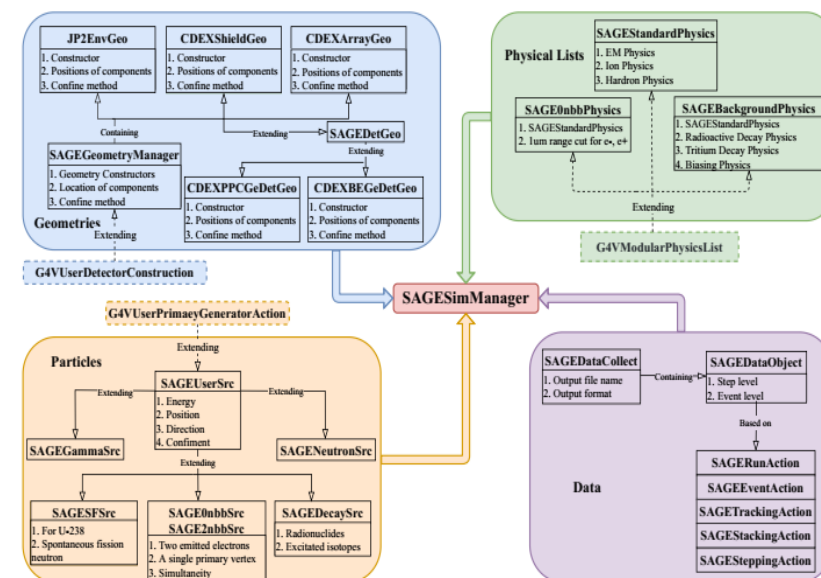
electro-form copper



LAr TPC



Solid Argon R&D



与工业界紧密联系

- ❑ 威视公司是CDEX合作组成员单位，世界级的辐射探测公司，并且为国际高能物理提供了批量的探测器系统，具备极为优秀的大规模生产能力。
- ❑ 清华+威视的大规模研发能力是CDEX合作组对国际富集锆 $0\nu\beta\beta$ 的重要贡献。
- ❑ 多种自主研发的商业高纯锆探测器已经实现市场化销售。

LN2 dewar



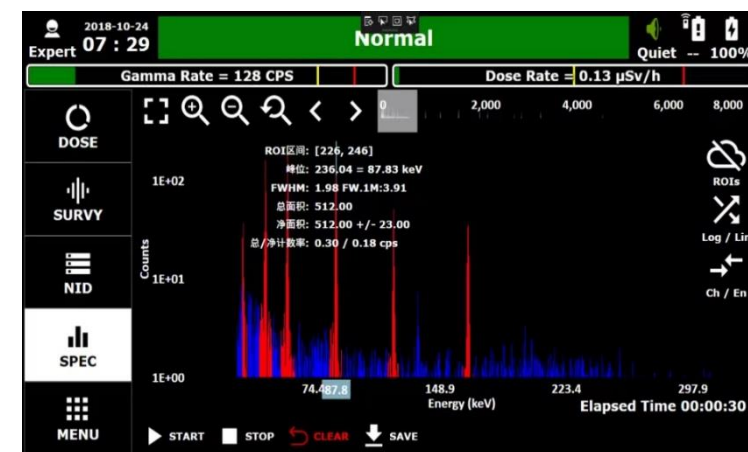
Electrical and LN2 Cooling dewar



Portable Electrical cooling



Mini-dewar



国际合作



- 2016年, CDEX是LEGEND创始成员单位 (CDEX、GERDA、Majorana) 。
- 2021年, CDEX和LEGEND商定各自独立发展: CDEX@CJPL、LEGEND@LNGS/SNOLab, 保持多层面的沟通和协调。
- CDEX是美国NSF支持的PIRE-GEMADARC重要成员 (R&D of next generation Ge technology for particle physics, Fund:\$4M).
- ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验设备可以多模块、多地点布置。在世界最深的锦屏地下实验室建设 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验系统, 深地平台好、技术积累加速推进, 具备大规模生产能力, 能对国际 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 共同体做出重要而独特的贡献, 而不仅仅是加剧竞争。

LEGEND 合作组 and PIRE 合作组会议



CDEX

Oct. 2016, Atlanta, LEGEND established



Nov. 2018, Knoxville, LEGEND



July, 2018, PIRE group meeting at Xichang, China



PIRE group Photo at Jinping Dam near CJPL, July, 2018

CDEX实验的独特优势

- ❑ 项目组将世界**富集锗探测器生产能力提升3-5倍**，对于未来1吨级和10吨级富集锗实验室重要贡献。
- ❑ 项目组多年投入大量经费持续推进富集锗国内自主生产能力的建设，实现**国际富集锗材料生产能力提升3-10倍**，对于未来1吨级和10吨级富集锗实验室重要贡献。
- ❑ 对于吨级富集锗-76实验，**CDEX的总造价是国外同行的1/4**。
- ❑ 地下晶体生长和探测器制备非常关键，可以把 ^{68}Ge 等宇生本底贡献**减低约20倍**，使**十吨级富集锗-76实验成为可能**。CDEX正在做这件事，并且已经取得了很大进展。

总结

- ❑ $0\nu\beta\beta$ 实验：中微子是否是自身反粒子的几乎唯一实验途径，以及其它多个物理。
- ❑ ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验是极具竞争力的实验方案：最优 E_R ，最好BI，无 $2\nu2\beta$ 本底干扰.....
- ❑ CDEX: 模块化、三阶段的大科学设施（CDEX-300、CDEX-1T和CDEX-10T）。
- ❑ CDEX实验对国际 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验共同体做出巨大贡献：
 - (1) 富集锗材料和锗探测器的大规模生产；
 - (2) 国际首次成功使用高纯锗探测器ASIC-PreAMP前端电子学，成为LEGEND下一阶段实验的方案；
 - (3) CJPL中的大型地下实验空间；
 - (4) 地下实验室高纯锗晶体生长和探测器制备，显著降低宇生本底，使十吨级方案成为可能。
- ❑ 国际合作是重要的：不仅参与合作和竞争，还要做出核心贡献。 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验装置可以多模块布置、也可以多实验地点布置，方便国际合作。CDEX合作组正在这个方向努力。