



CDEX-300 ν 无中微子双贝塔衰变实验进展

杨丽桃

清华大学

CDEX合作组



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

第二届无中微子双贝塔衰变及相关物理研讨会
2023年5月19日-5月23日, 广东 珠海



中国暗物质实验
China Dark matter EXperiment



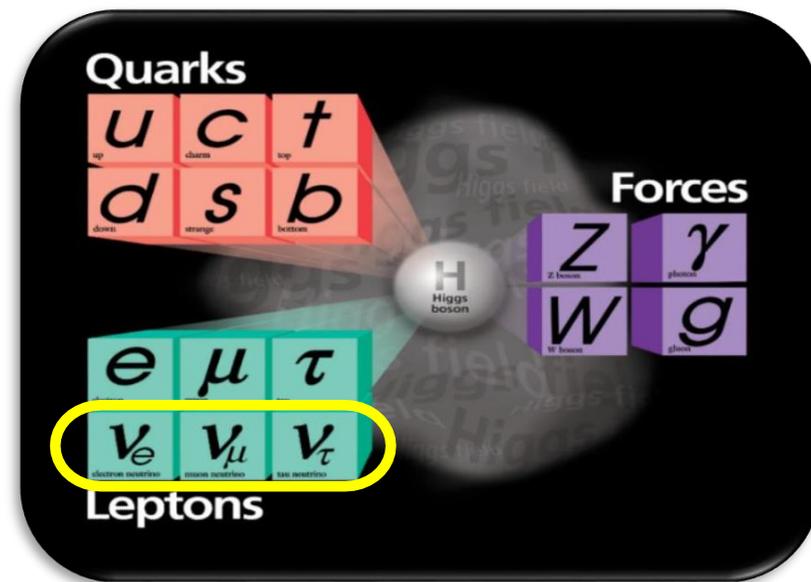
内容提要

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

- 科学目标
- CDEX合作组简介
- CDEX-300v实验计划
- CDEX-300v关键技术预研
- 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

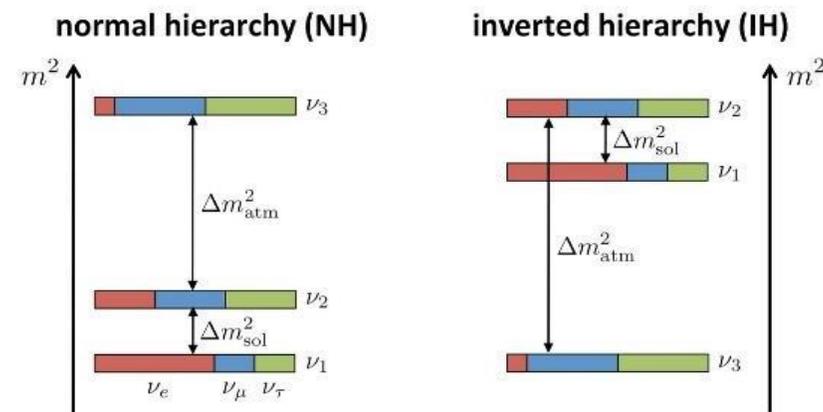
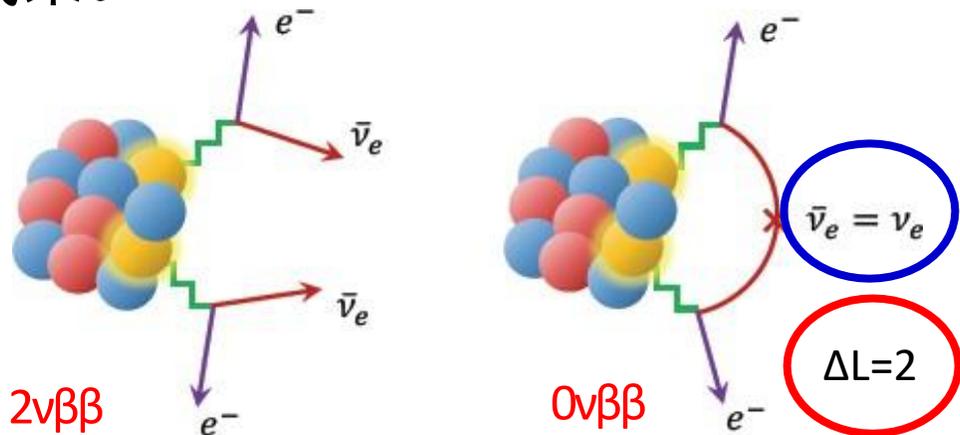
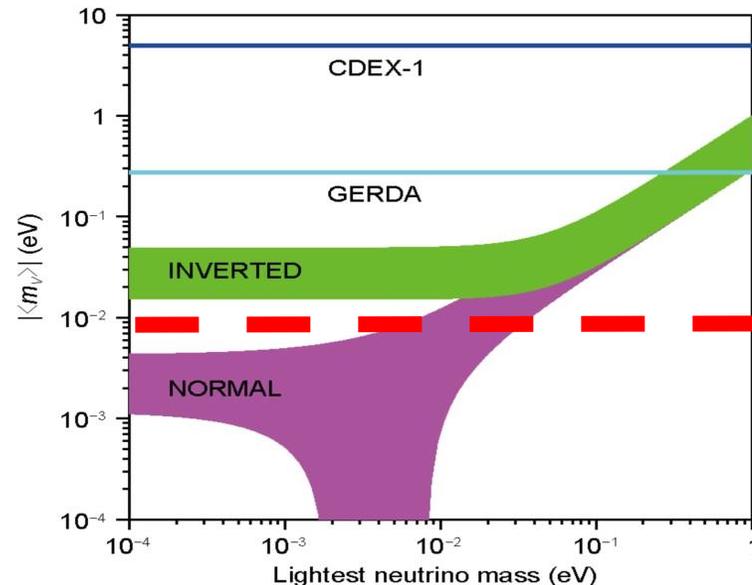


Arthur B. McDonald

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

无中微子双贝塔衰变实验 ($0\nu\beta\beta$)

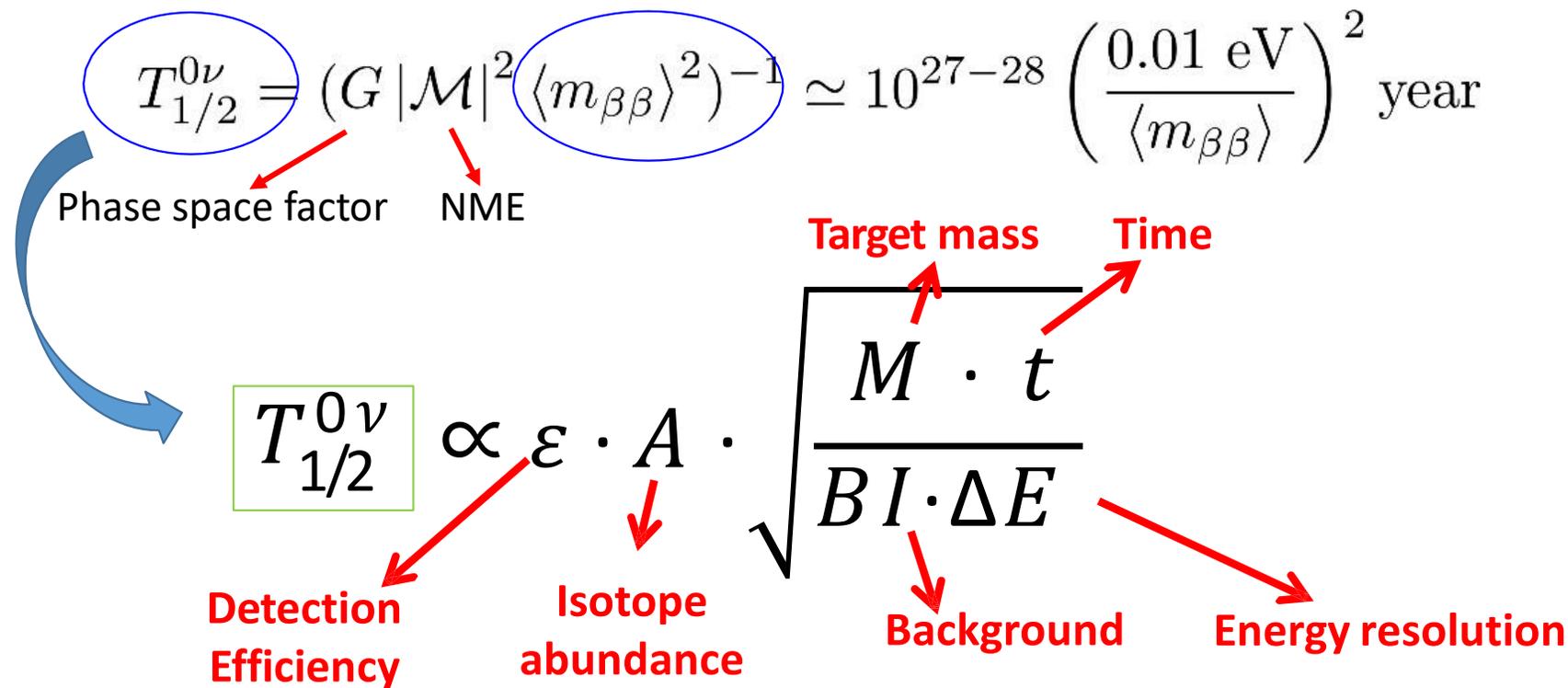
- $0\nu\beta\beta$: 研究中微子是否是自身反粒子的几乎唯一有效实验途径;
- 中微子质量顺序: 灵敏度达到约10meV, 可以给出中微子质量顺序测量结果;
- 轻子数不守恒: 如果发现 $0\nu\beta\beta$ 信号, 就是实验上测量到了轻子数不守恒过程, 是极其重要的科学成果。





$0\nu\beta\beta$ 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: $m_{\beta\beta} < 100\text{meV}$;
- 特征: $Q_{\beta\beta}$ 能点处的能量峰;
- $BI, \Delta E, M, t, A, \varepsilon$ 是 $0\nu\beta\beta$ 实验的重要参数;
- 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。**



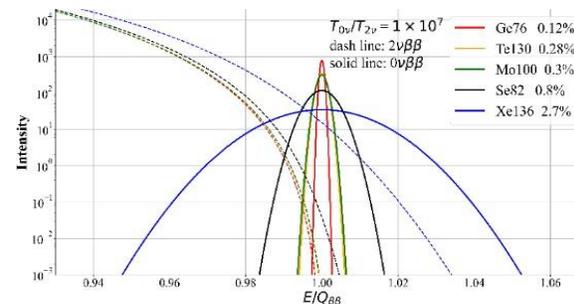
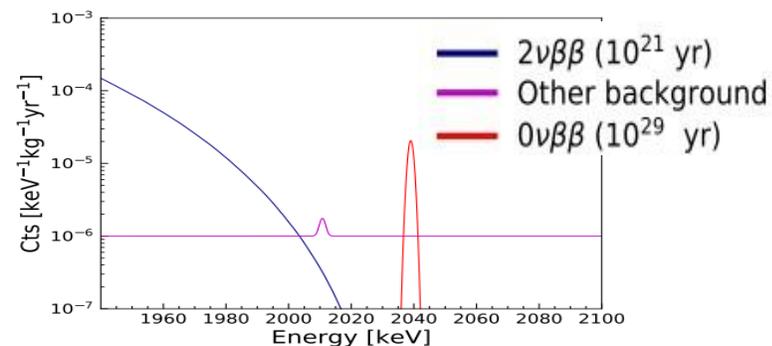
^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验优势

□ 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。

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

Detection Efficiency $\leftarrow \varepsilon$
 Isotope abundance $\leftarrow A$
 Target mass $\leftarrow M$
 Time $\leftarrow t$
 Background $\leftarrow B I$
 Energy resolution $\leftarrow \Delta E$



Ref:

- MJD: PRL 120 132502 (2018)
- CUORE: PRL 124 122501 (2020)
- CUPID-Mo: EPJC 80 44 (2020)
- CUPID-O: EPJC 78 734 (2018)
- EXO-200: PRL 123 161802 (2019)



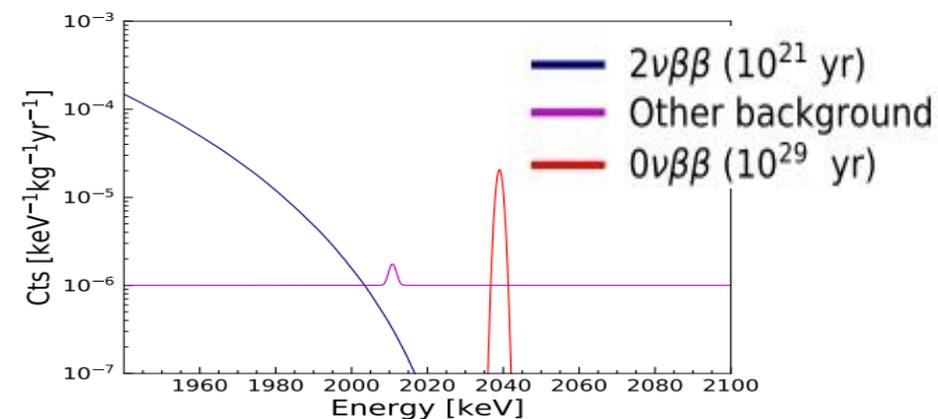
^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验优势

- **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。

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

Diagram illustrating the factors influencing the half-life measurement of ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ decay. The equation is annotated with red arrows pointing to the following parameters:

- $T_{1/2}^{0\nu}$ (Half-life)
- ε (Detection Efficiency)
- A (Isotope abundance)
- M (Target mass)
- t (Time)
- $B I \cdot \Delta E$ (Background 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 $0\nu\beta\beta$ 的实验技术之一。

□ 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-II 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

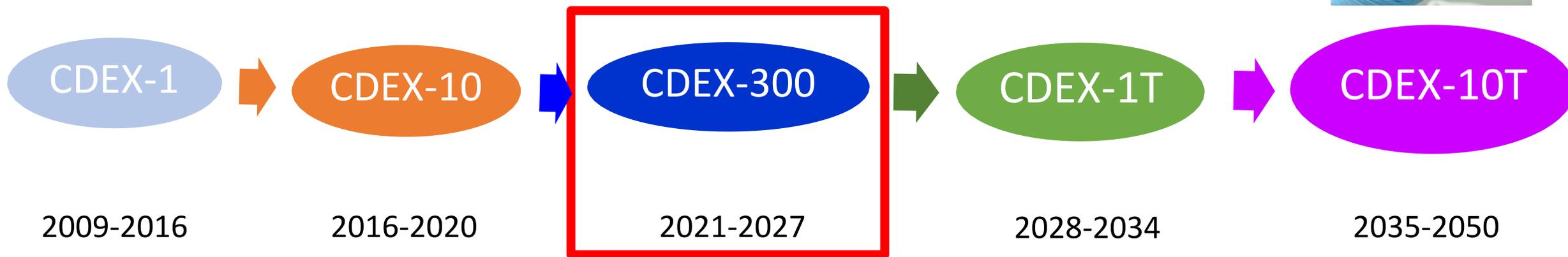
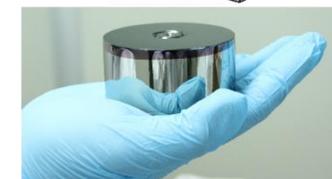
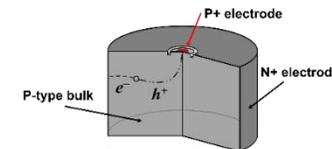
□ 科学目标:

- ✓ 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
- ✓ 同时, 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

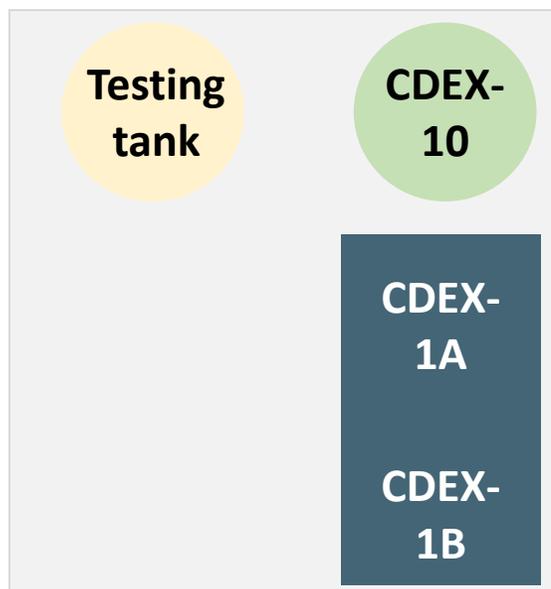
- 2009年建立，11个大学和研究所，超过100位合作组成员；
- 科学目标：利用高纯锗开展暗物质和中微子实验研究；
- 过去十多年，已经取得了一系列国际前沿水平的研究成果；



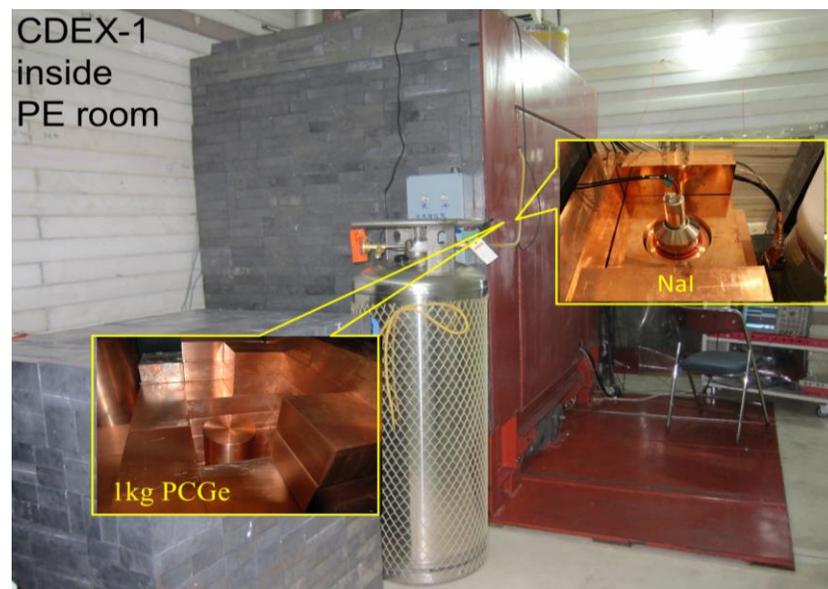
CDEX-1

- 两套单体1kg的点电极高纯锗探测器: CDEX-1A(prototype, 2011)→1B(upgraded, 2013);
- 传统的冷指制冷;
- 低本底铅&铜屏蔽体+碘化钠反符合;
- 位于1米厚的聚乙烯室中@CJPL-I;

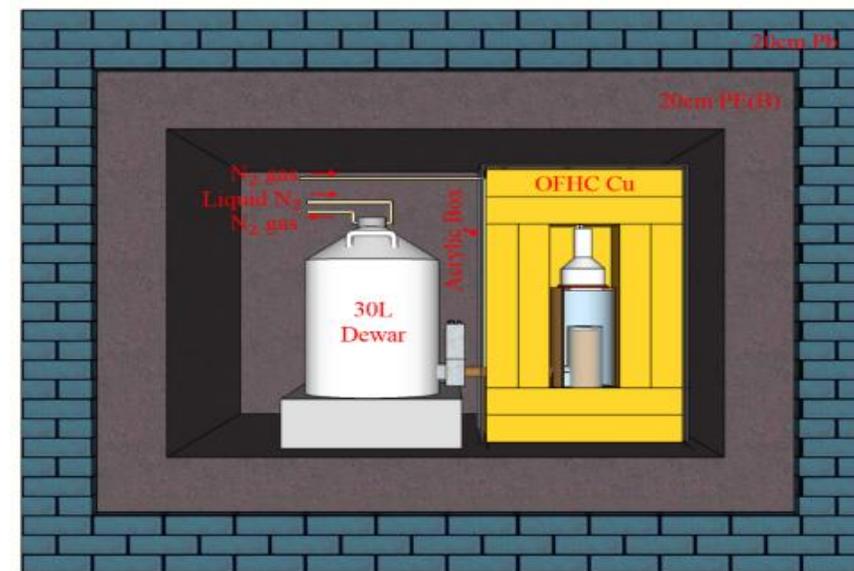
CPC 42, 023002 (2018)



Layout of PE room, CJPL-I



CDEX-1 inside PE room



CDEX-1A&B: 1kg PPC Ge × 2

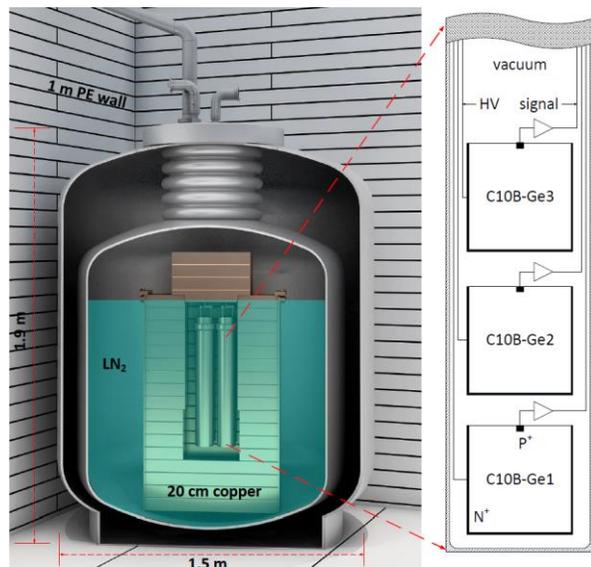
CDEX-10

- 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；
- 建立了国际上第一个液氮直冷高纯锗阵列系统，质量达到10kg，国际同类最大；
- 发展了阵列化探测器系统的数据合成方法，以及多探测器联合的物理分析框架；

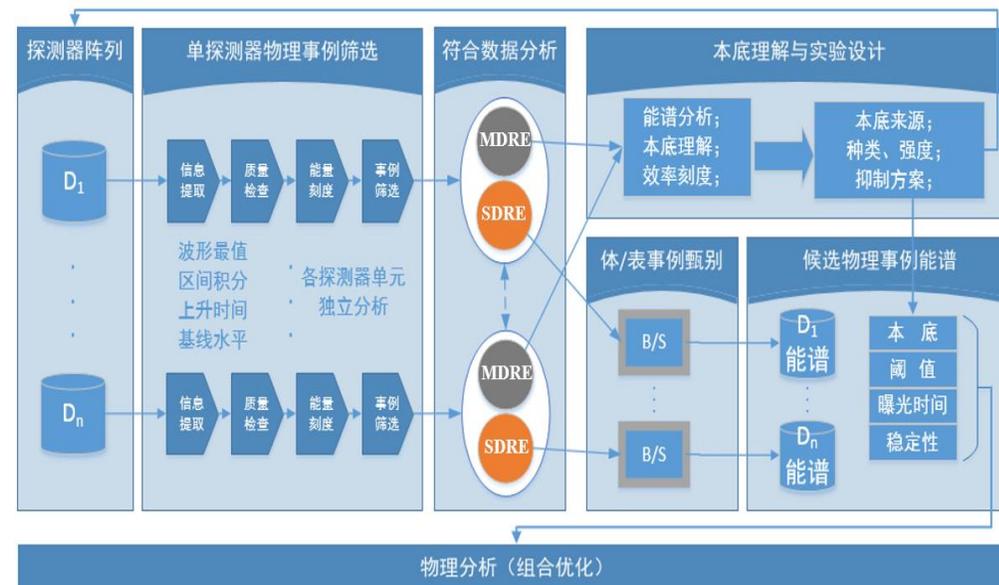
Science China-PMA 62, 031012 (2019)



CDEX-10阵列高纯锗探测器测试



CDEX-10暗物质实验系统

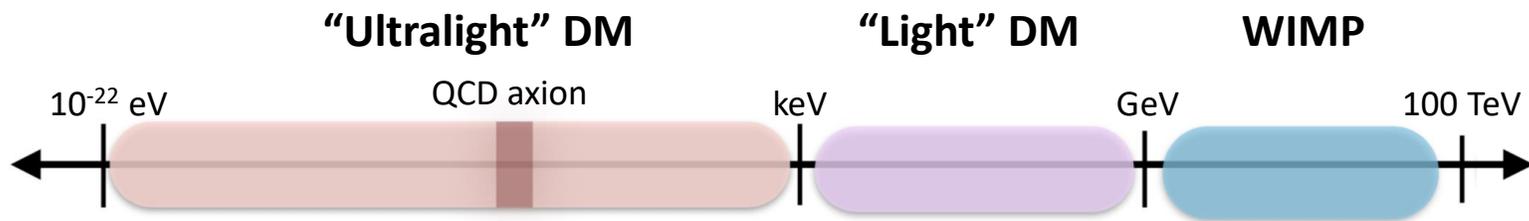


阵列化探测器系统数据合成方法框图



物理成果

- ✓ 开展**暗物质直接探测**，扫描理论参数空间，给出国际先进水平的物理成果；
- ✓ 开展**无中微子双贝塔衰变**实验预研，给出我国首个 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验结果；



中微子性质研究

$0\nu\beta\beta$

Sci. China PMA 60, 071011 (2017)
 PRD 106, 032012 (2022)
 arXiv: 2305.00894 (2023)

超标准模型相互作用 arXiv: 2210.01604 (2022)

暗物质物理成果

轴子
 PRD 2017
 PRD 2020

暗光子
 PRL 2020

加速暗物质
 PRD 2022

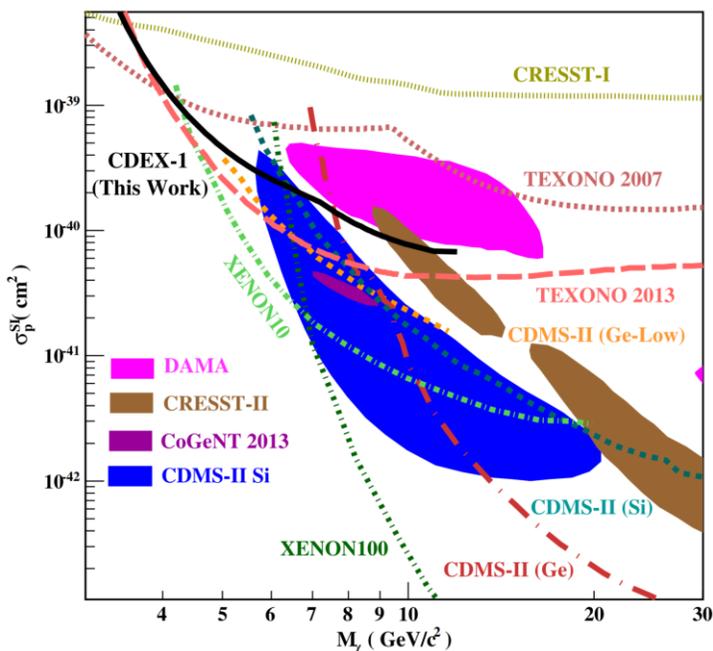
Migdal非弹
 PRL 2019
 PRD 2022
 PRL 2022

WIMP暗物质
 CPC 2018
 PRL 2018
 PRL 2019
 PRL 2022

WIMP暗物质探测

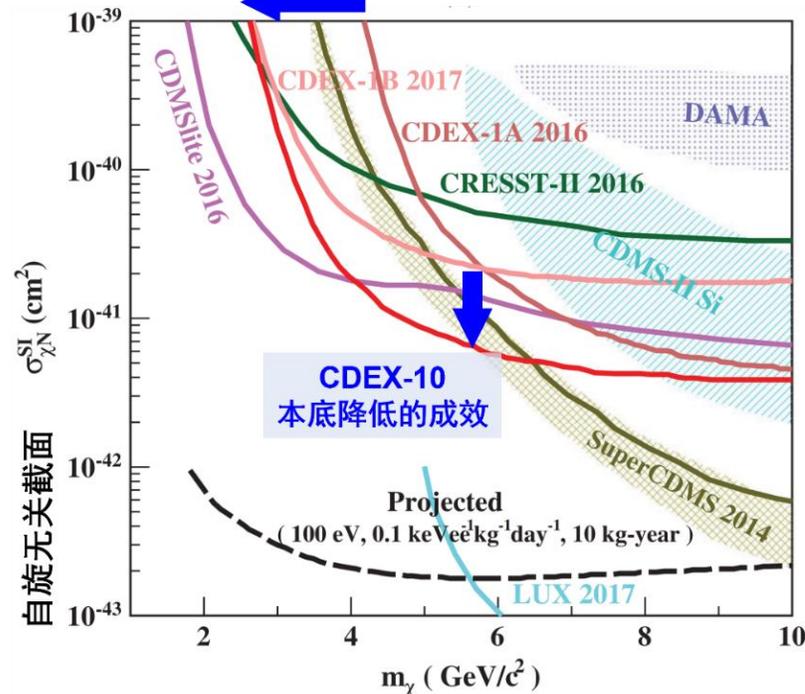
- 2013年，发表**我国首个自主**暗物质直接探测实验结果，自旋无关探测灵敏度达到国际水平；
- 2018年，基于CDEX-10，给出**4-5 GeV区间**自旋无关国际最灵敏实验结果；

PRD 88, 052004(2013)



PRL 120, 241301 (2018)

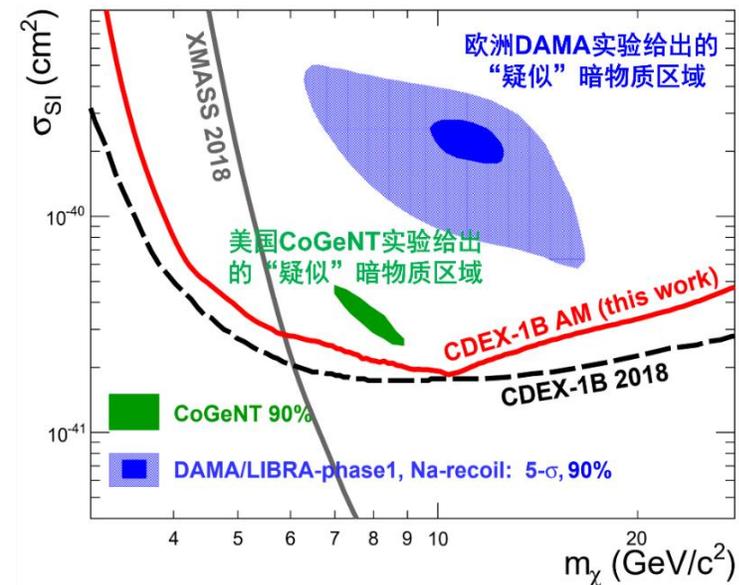
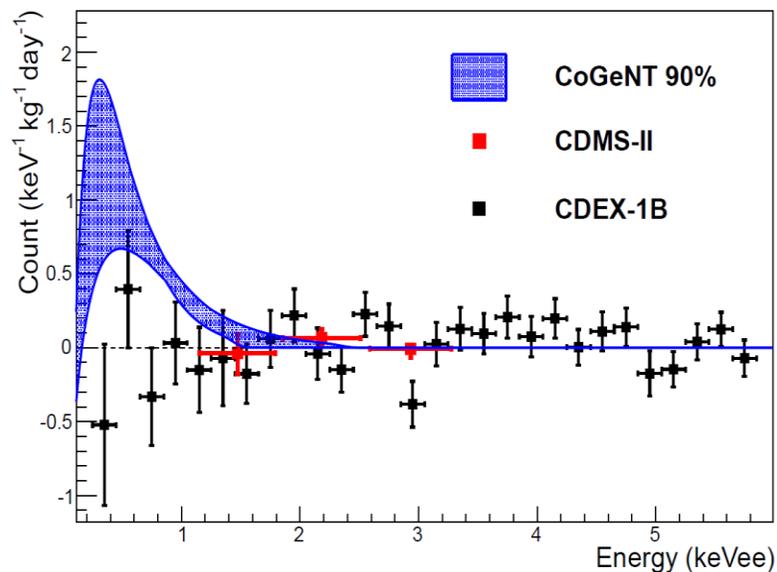
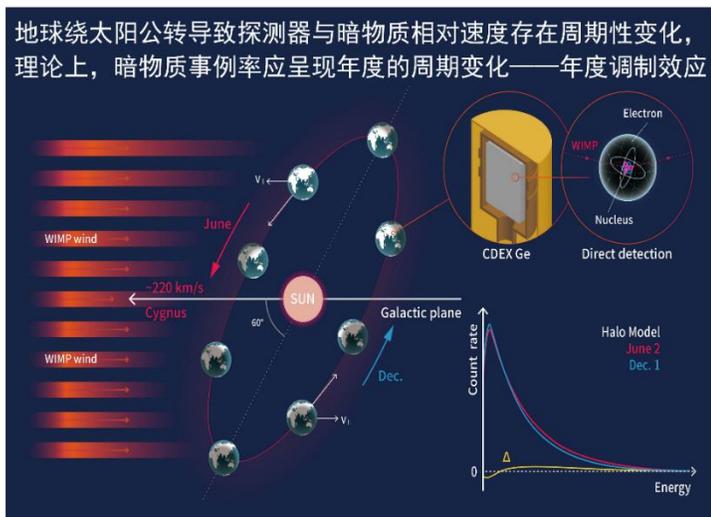
CDEX-10 阈值降低的成效



暗物质年度调制

- 2019年，利用CDEX-1B四年多的实验数据，开展暗物质年度调制效应研究，没有发现明显的年度调制信号；
- 确定地排除了美国CoGeNT实验宣称探测到的“疑似”暗物质信号；对质量小于6 GeV的暗物质年度调制灵敏度限制达到世界最好水平；

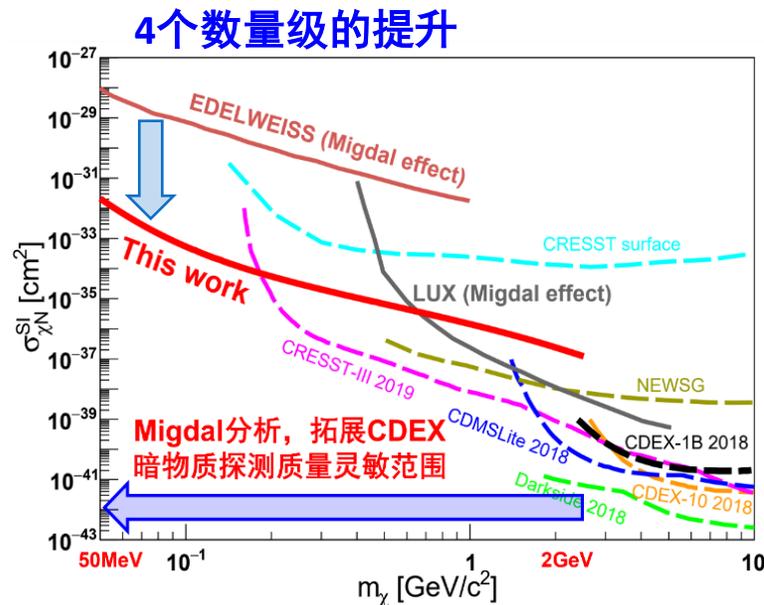
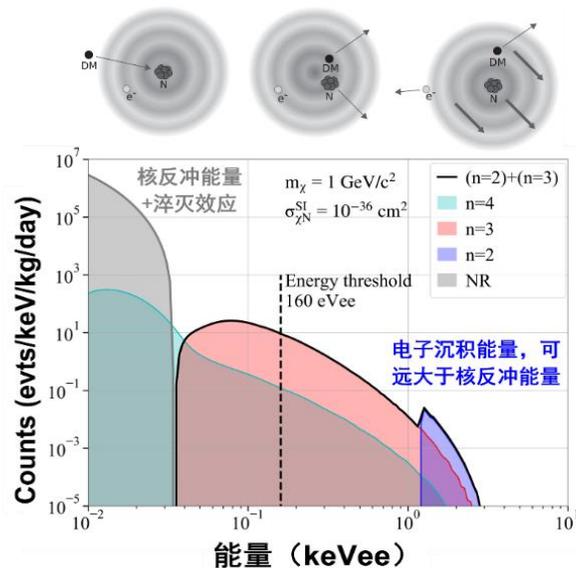
PRL 123, 221301 (2019)



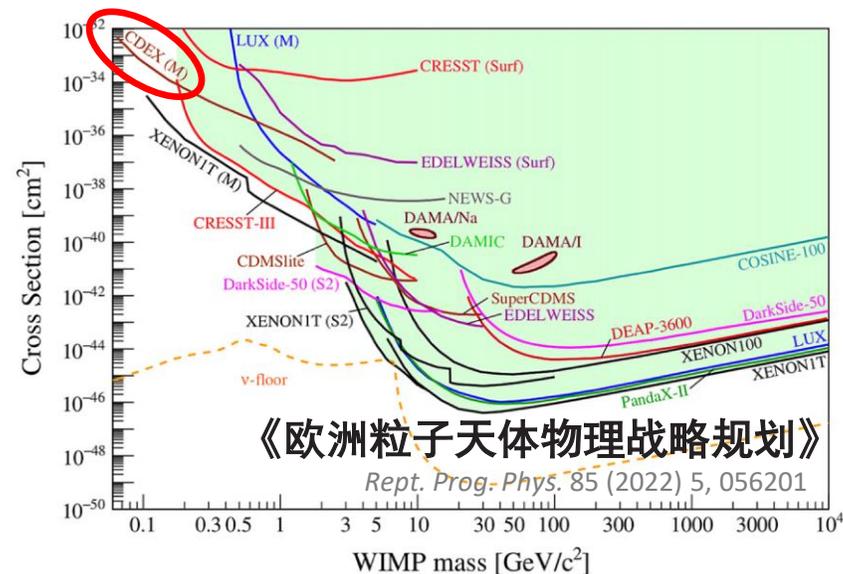
基于Migdal效应的轻质量暗物质探测

- 开展亚GeV轻暗物质探测，将CDEX暗物质质量灵敏范围从2 GeV下推至50 MeV；
在**50-180 MeV质量区间**截面限制灵敏度达到**世界最好水平**；
- 国际暗物质探测向更轻质量区域拓展，被《欧洲粒子天体物理战略规划》引用；

PRL 123, 161301 (2019)



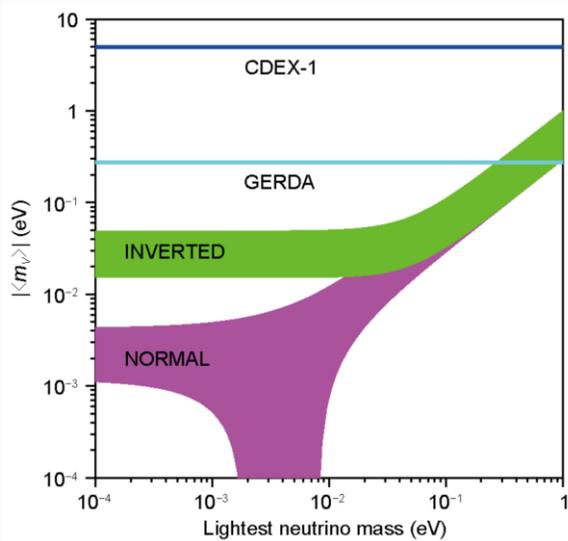
Several results using this effect were already published with the **strongest ones being from XENON1T and CDEX** above and below 110 MeV/c², respectively.



中微子物理研究

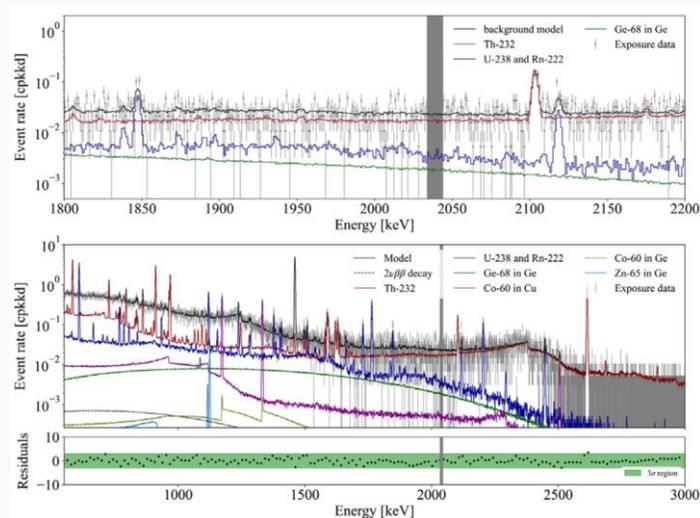
- 2017年，发表**我国首个 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变实验结果**；
- 2022年，针对**未来 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验探测器选型**，进行了技术预研；
- 2022年，开展了**中微子超标准模型相互作用（NSI）等新物理实验研究**；

我国首个 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 结果



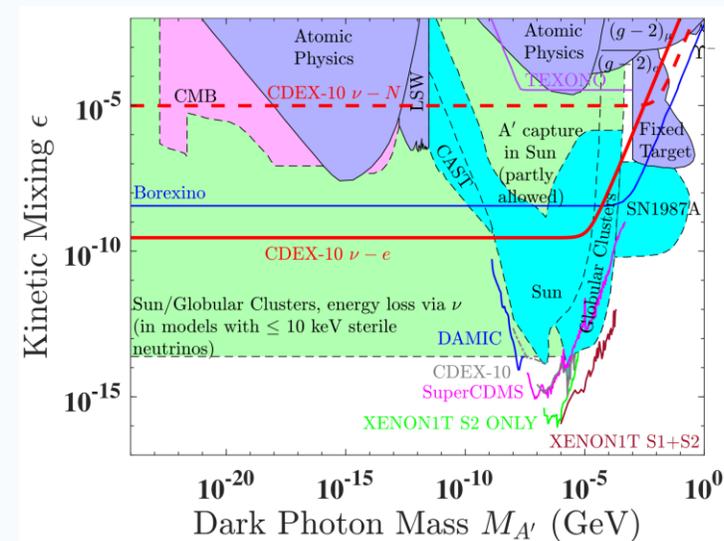
Sci. China PMA. 60, 071011 (2017)

未来 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验的探测器选型技术预研



PRD 106, 032012(2022)

中微子超标准模型相互作用
低质量区耦合参数国际最好的实验室限制



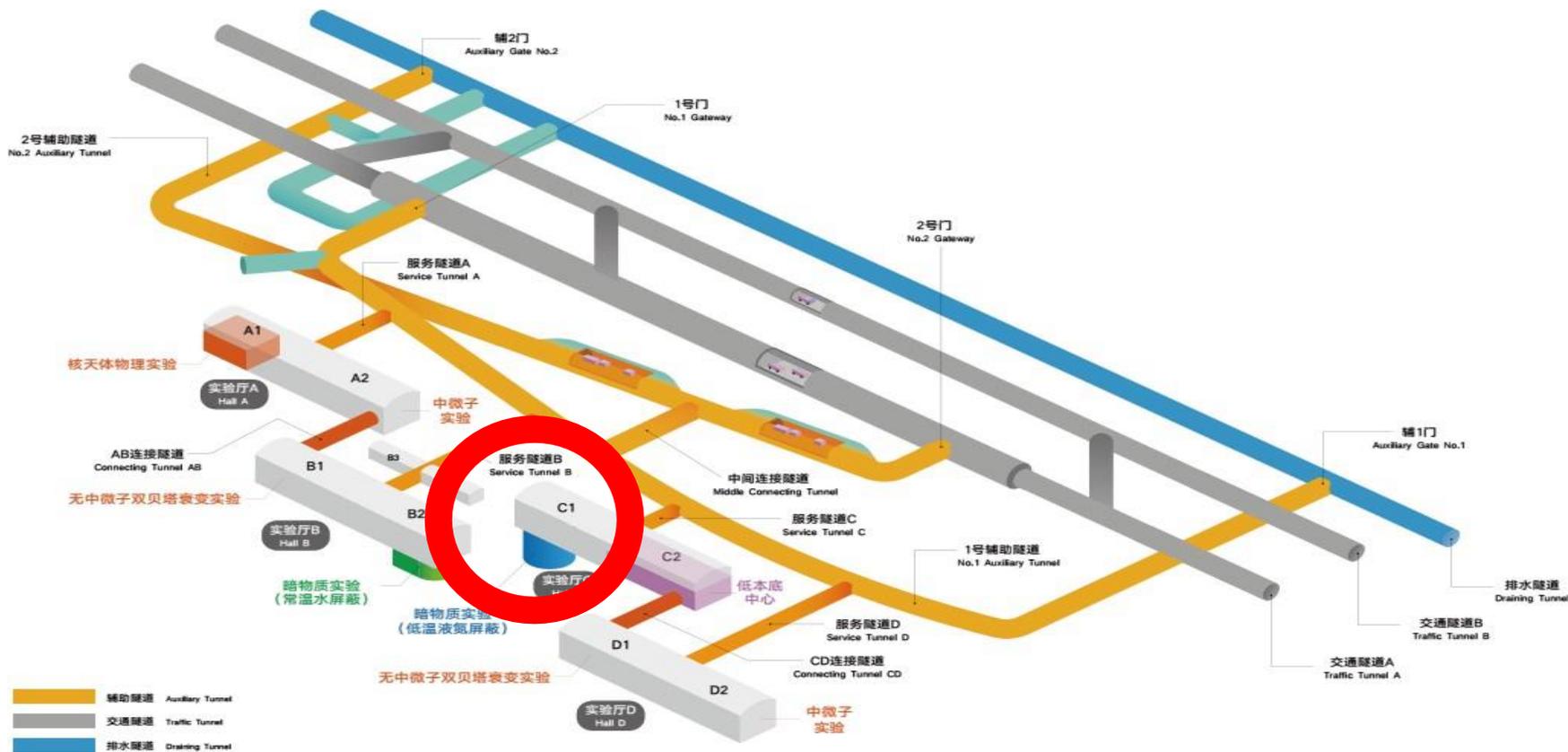
arXiv: 2210.01604 (2022)



CDEX-300 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验

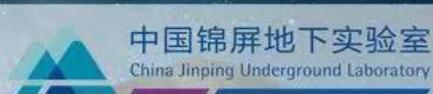
□ CDEX-300目前正在CJPL-C1厅建设:

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



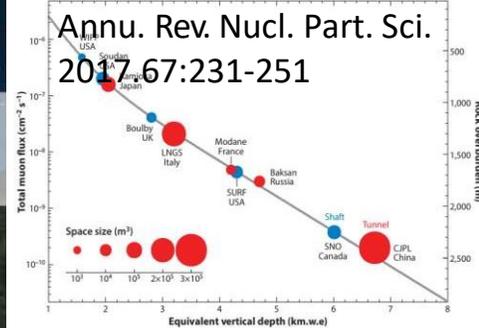
国家重大科技基础设施

极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施

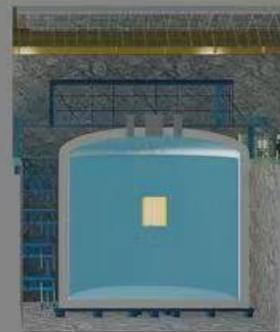


中国锦屏地下实验室
China Jinping Underground Laboratory

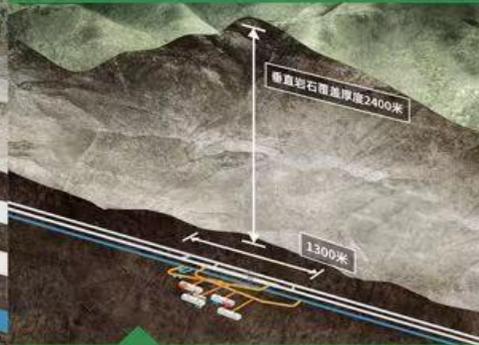
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2017.67:231-251



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

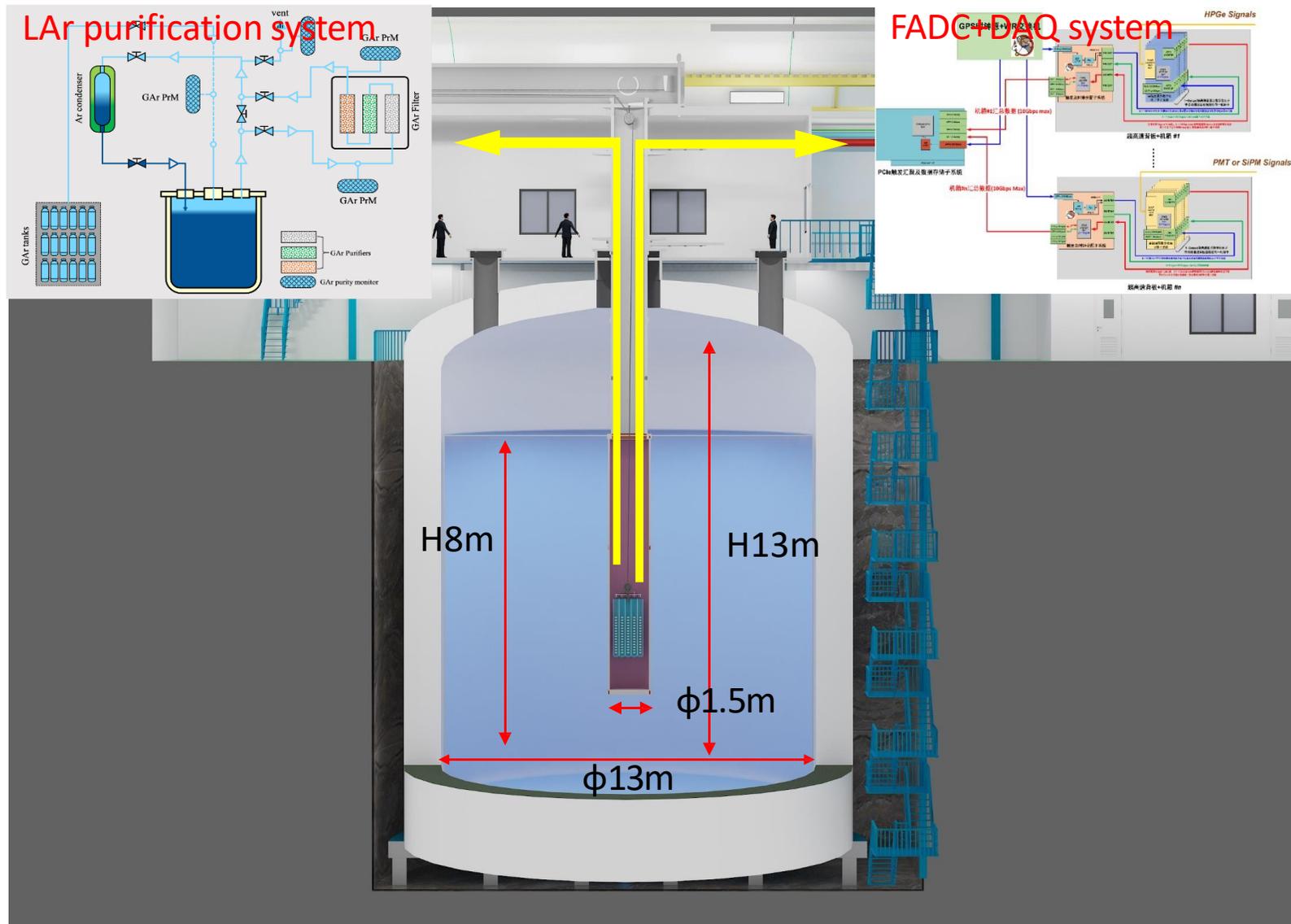


CJPL



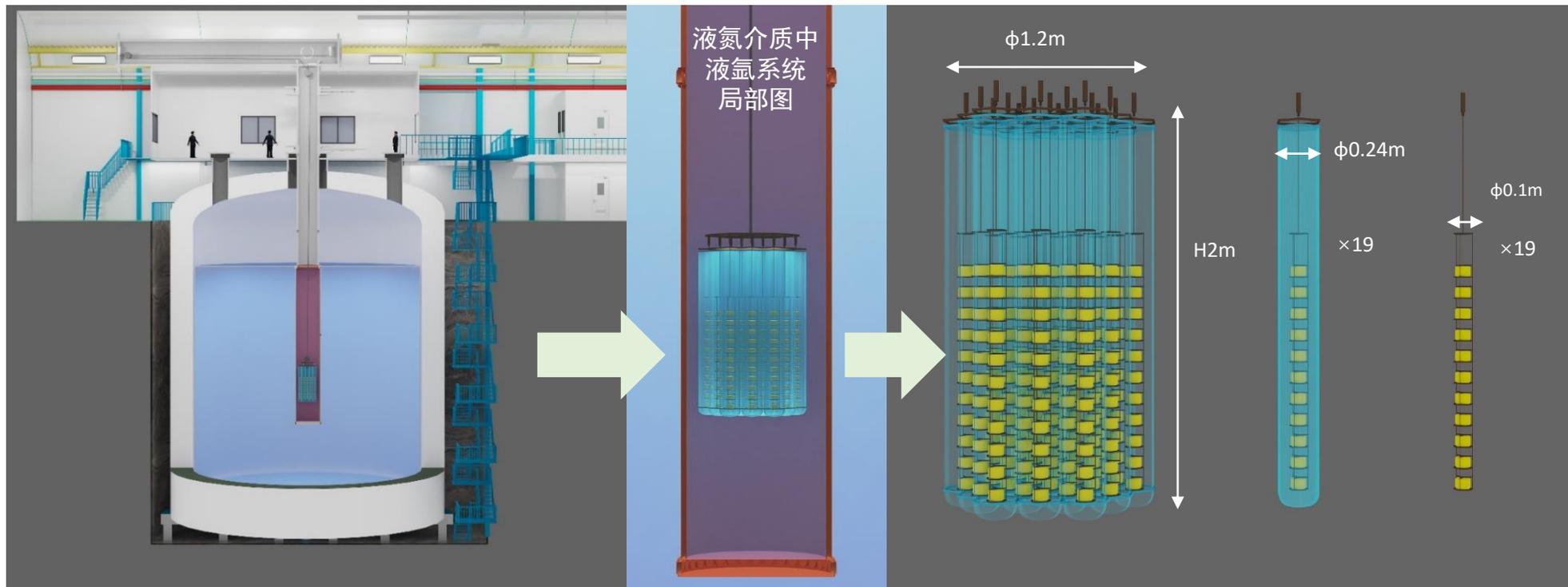
CDEX-300 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验

- ❑ $\sim 300\text{kg } ^{76}\text{Ge}$
- ❑ Physics goal:
 - $T_{1/2} > 10^{27} \text{ yr}$, $m_{\beta\beta} < 30\text{-}70 \text{ meV}$
- ❑ BEGe + ASIC + Silicon Substrate
- ❑ 225 kg富集高纯锗阵列
- ❑ 20T LAr屏蔽和反符合
- ❑ 1725m^3 液氮低温屏蔽系统
- ❑ 顶部和侧面 $400\text{-}500\text{m}^2$ 实验室



CDEX-300v总体结构

- ▶ 高纯锗探测器阵列和液氦反符合探测器通过实验腔与液氮实现物理隔离：
 - ✓ 富集锗探测器阵列系统 (^{76}Ge 富集度 $>86\%$)，质量达到约225 kg；
 - ✓ 液氦反符合探测器系统，降低实验装置自身放射性本底；



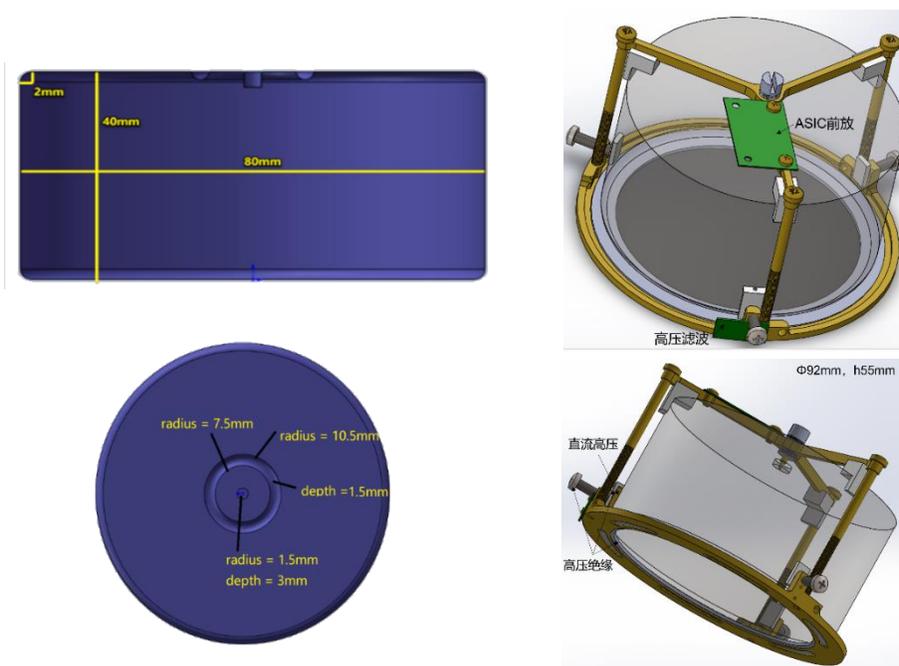
C1厅1725 m³液氮恒温器

液氦系统

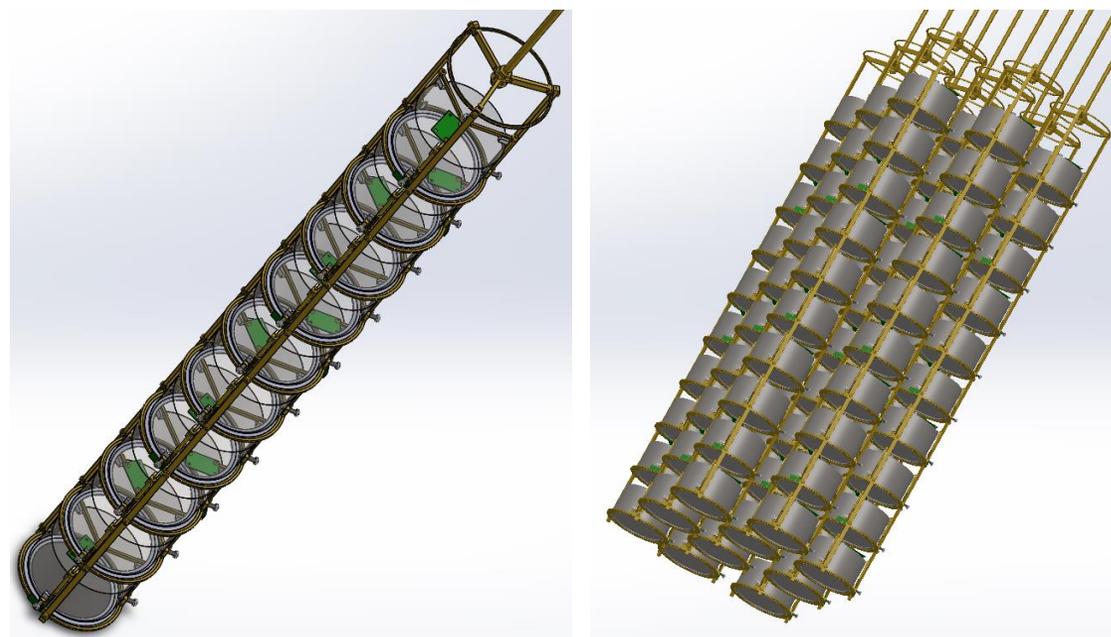
富集锗阵列

CDEX-300v高纯锗探测器

- 200个单体质量约1.12 kg探测器单元，采用富集Ge-76原材料制作、串列设计
 - ✓ 读出电极：采用点电极结构以降低输入电容，提高能量分辨
 - ✓ 结构件：采用低质量低本底设计，主要由高纯电解铜和高纯聚四氟乙烯制成
 - ✓ 前端电子学：采用自主研发的低温低噪声ASIC芯片，CMOS集成电路工艺，高纯度硅基板



BEGe高纯锗单元



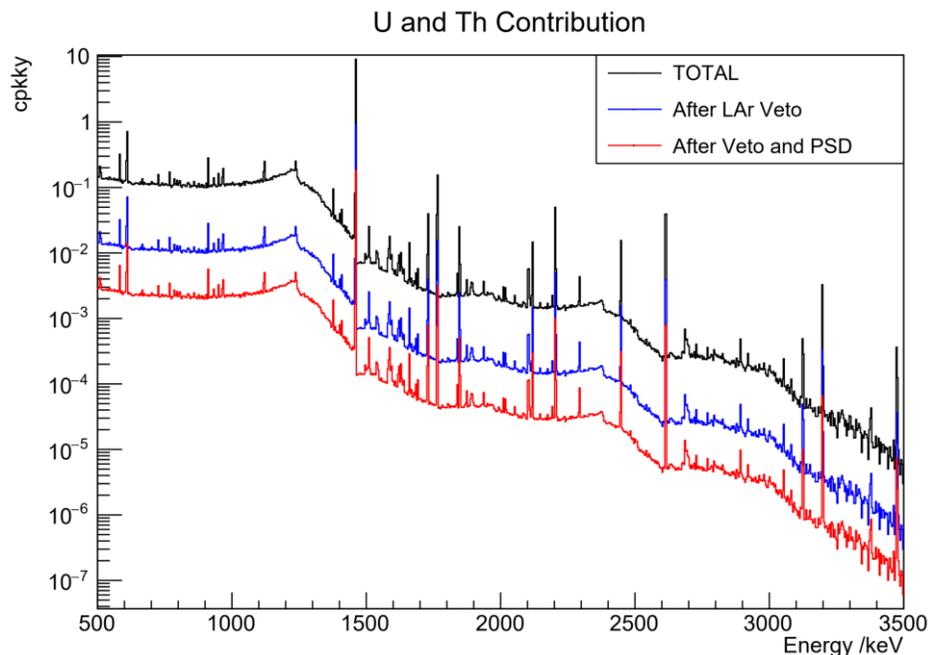
BEGe高纯锗阵列

CDEX-300v液氩反符合探测器

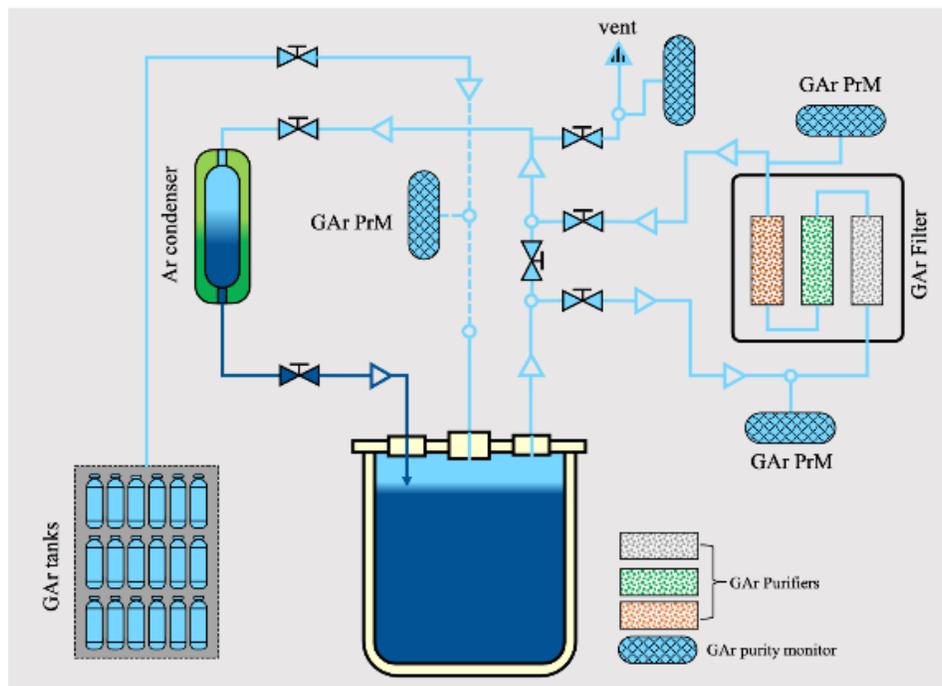
■低温环境（87 K）+液氩反符合：

✓ 液氩体积为（ ϕ 1.5 m \times H 8 m）14 m³、采用光纤读出；

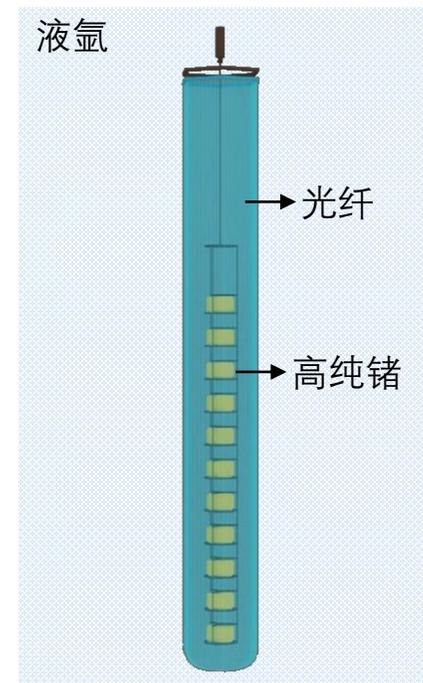
✓ 液氩纯化系统，将5N氩气中的H₂O、O₂、N₂、CO₂等杂质浓度降至小于10ppb。



U、Th的本底贡献，以及液氩主动反符合、高纯锗PSD的本底压低能力



液氩纯化系统



光纤读出

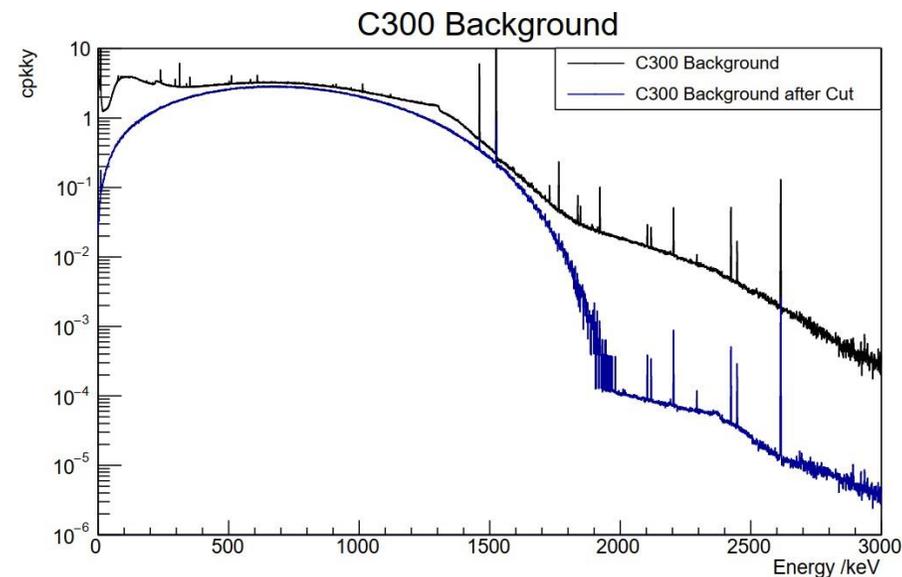
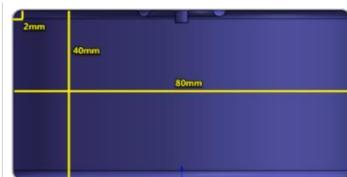
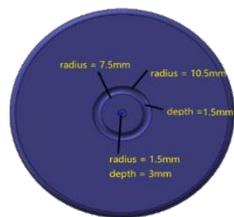
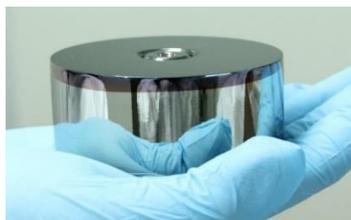


CDEX-300v本底模拟

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

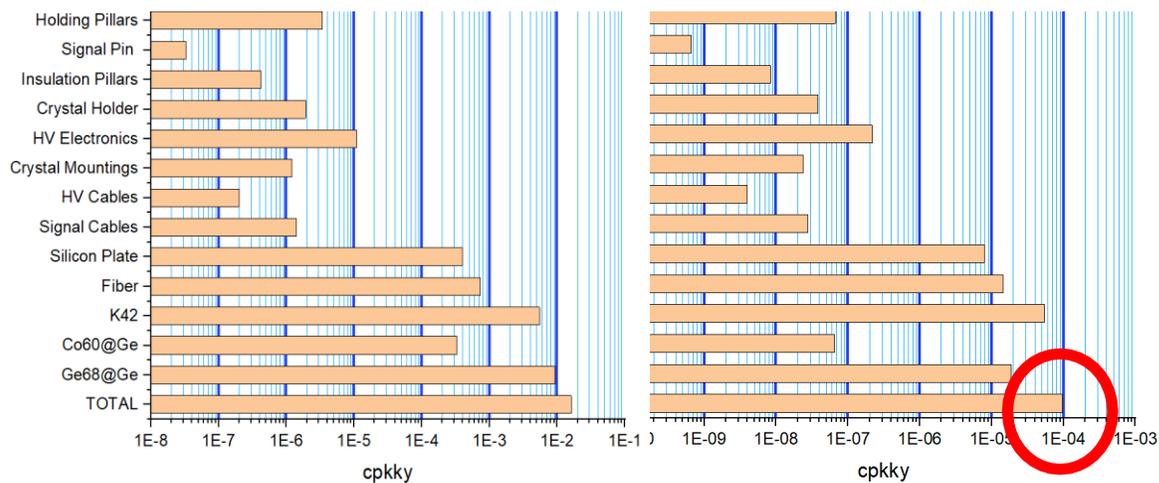
本底水平: 1×10^{-4} cpkky @ $Q_{\beta\beta}=2.039\text{MeV}$ (CJPL, ASIC,



Background sources

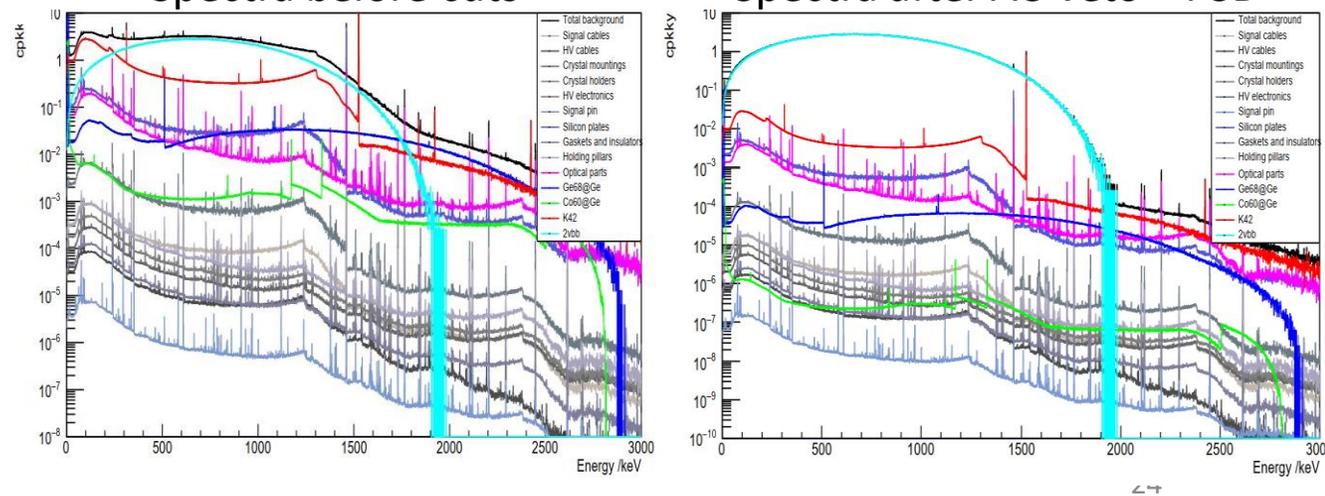
before cuts

after AC Veto + PSD



Spectra before cuts

Spectra after AC Veto + PSD



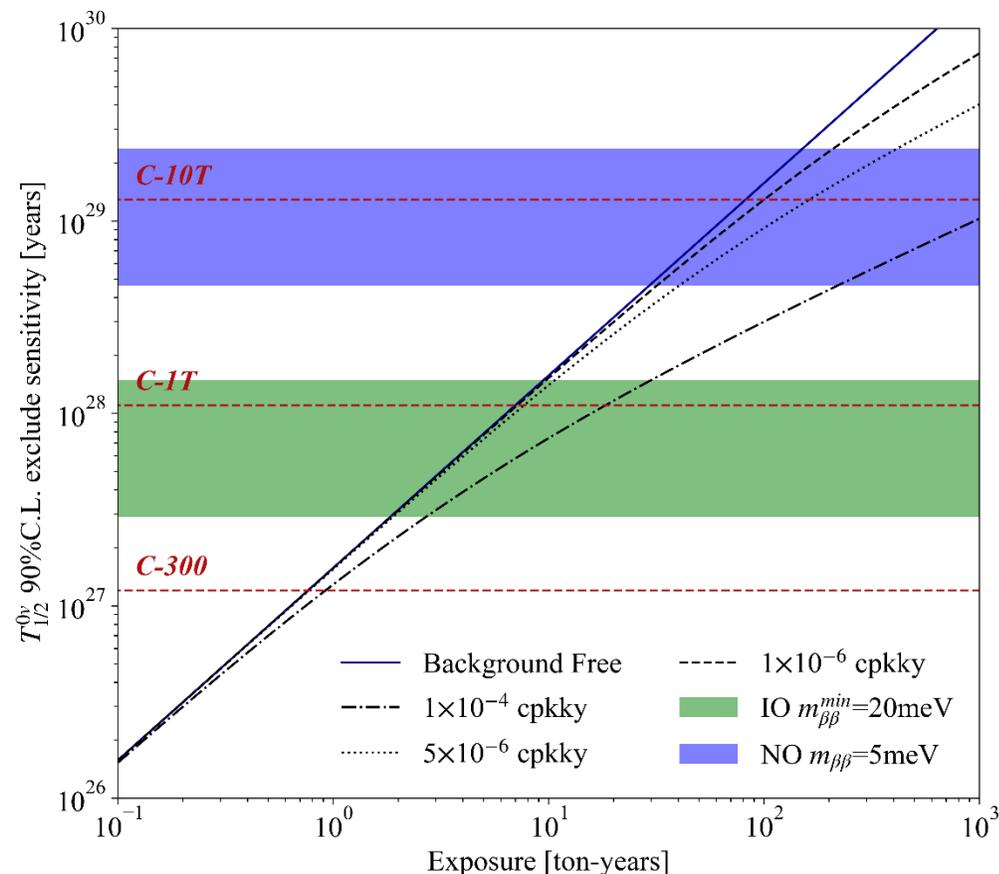


CDEX-300v实验

□ 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



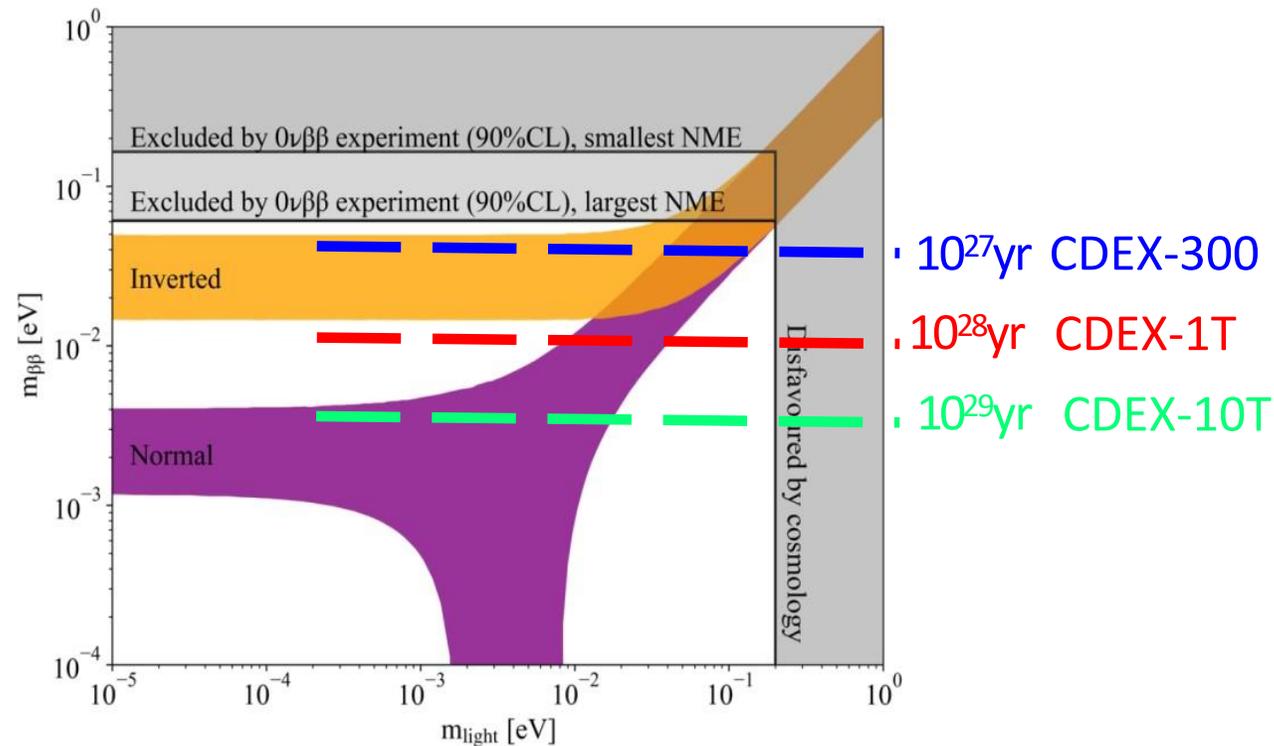
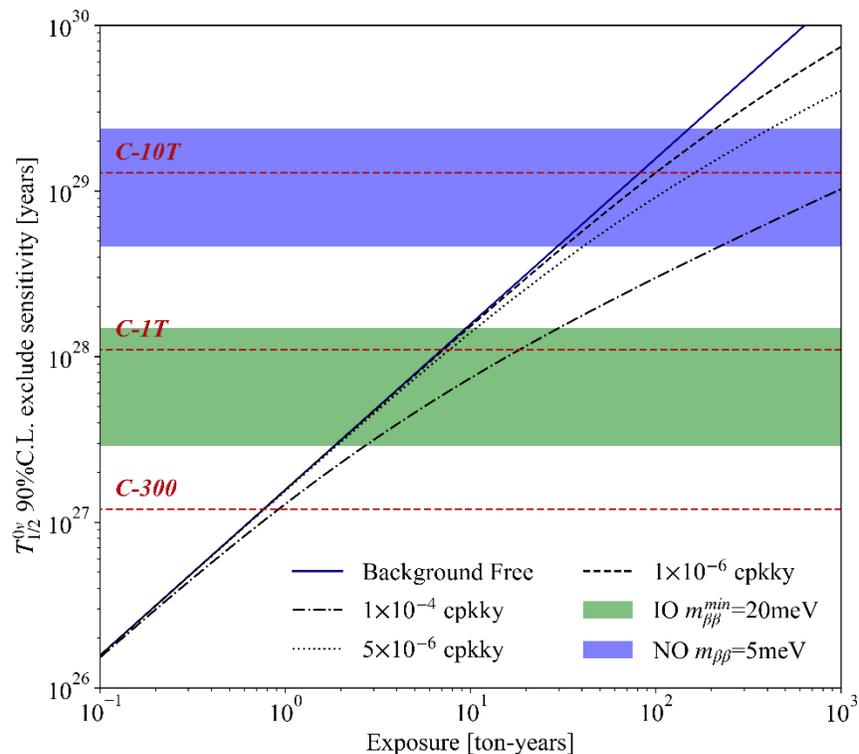


CDEX $0\nu\beta\beta$ 实验关键参数、物理结果

- ❑ 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
$T_{1/2}$	$>1.0 \times 10^{27}$ y	$>1.0 \times 10^{28}$ y	$>1.0 \times 10^{29}$ y
$m_{\beta\beta}$	<[28.5~68.0] meV	<[11.6~26.4] meV	<[2.9~6.7] meV

CDEX-1T and CDEX-10T物理目标



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

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



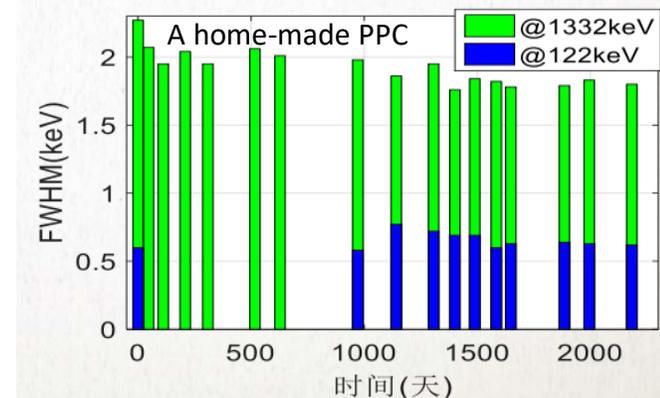
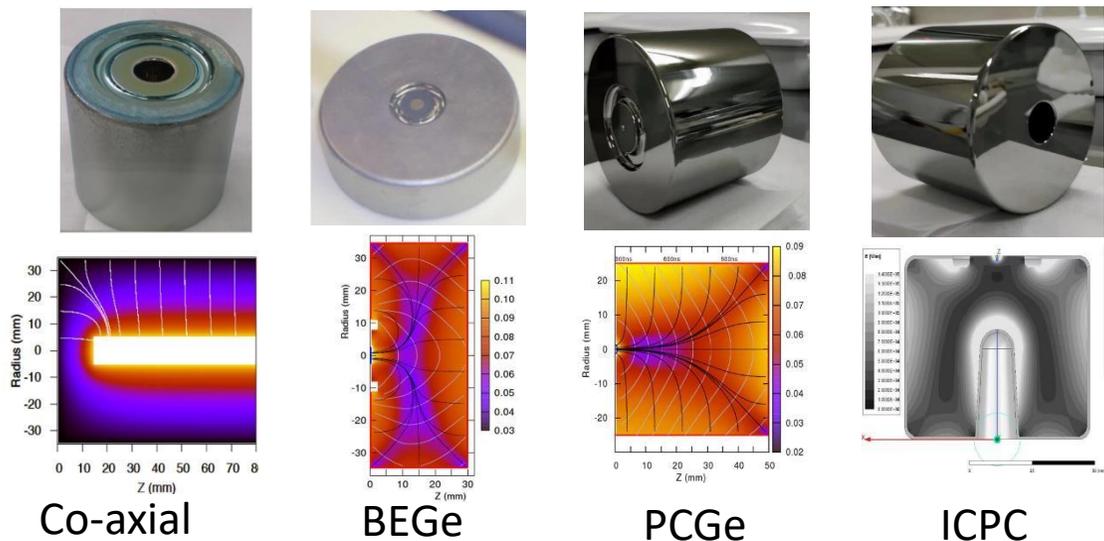
高纯锗关键技术预研

- 锗探测器制备
- ASIC前端电子学
- 锗晶体生长
- 富集锗材料供应
- 其他关键技术

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 assemble;
- ✓ Underground testing...

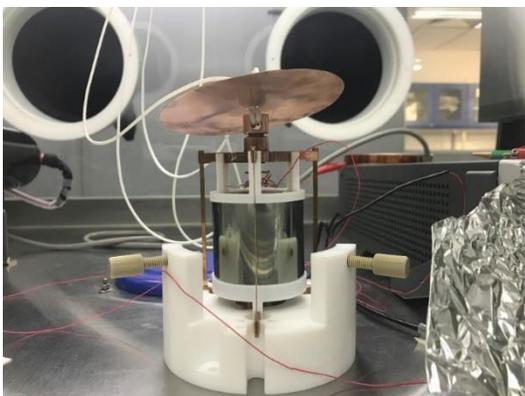
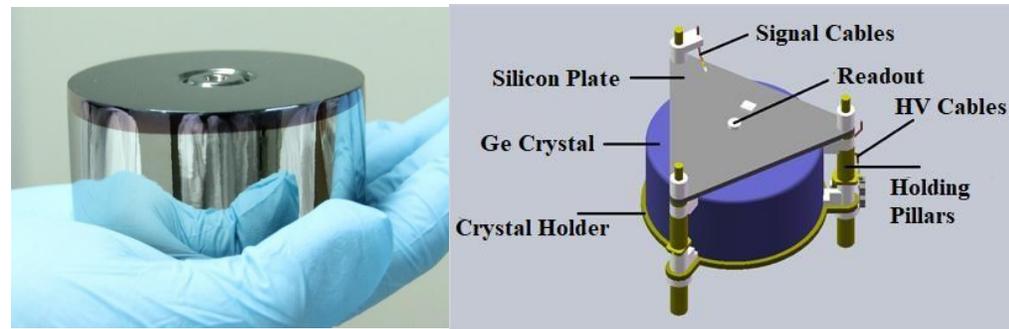


高纯锗技术—ASIC前端电子学

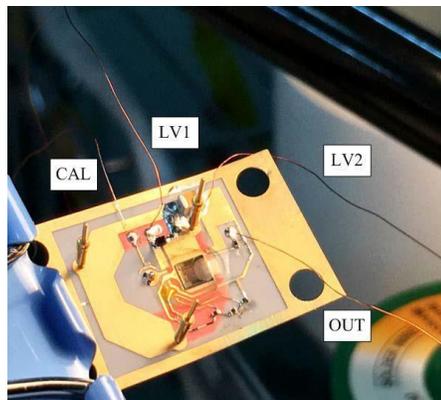
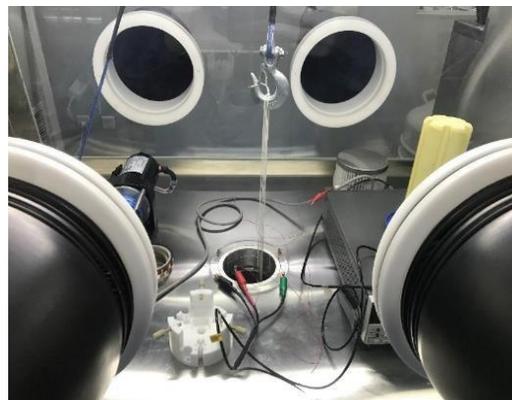
□ 世界第一个点电极高纯锗+CMOS ASIC探测器，完成液氮浸泡测试。

自主研制500g Ge + CMOS ASIC preamp + LN₂

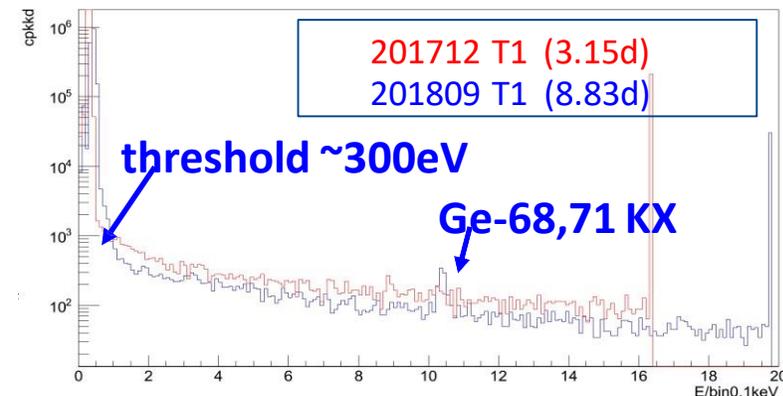
□ 性能良好，本底优异。



Fabricated and Tested in CJPL-I



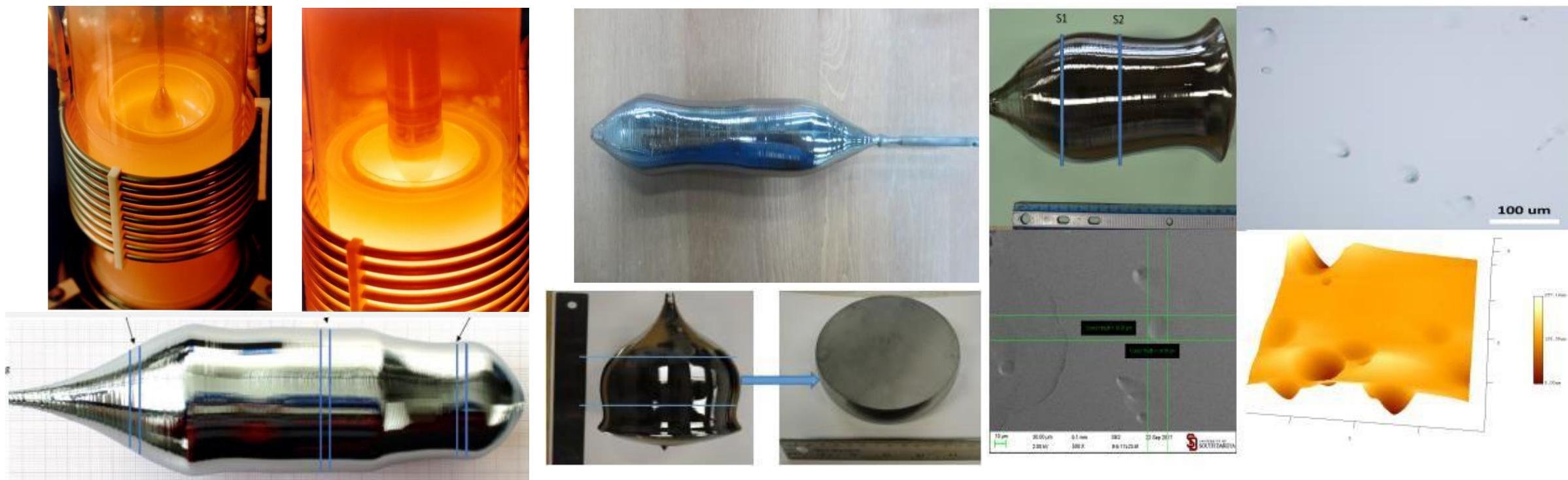
ASIC PreAMP



Background spectrum @CJPL

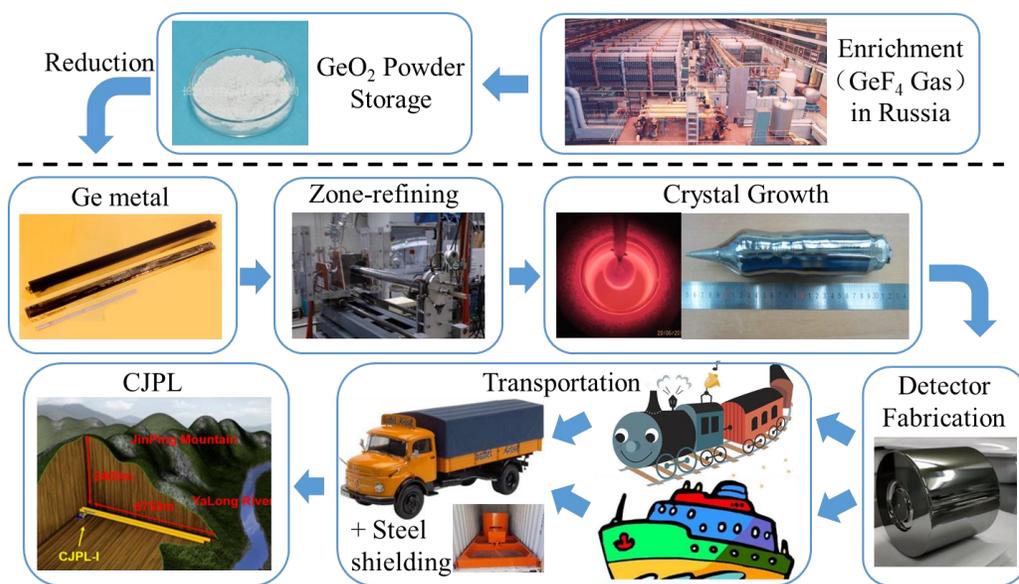
高纯锗技术— 锗晶体生长

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



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；
- ❑ 推动实现了富集锗材料的大规模国产化；



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；
- ❑ 开展液氩/固氩反符合技术研究；
- ❑ SAGE：高纯锗本底和波形模拟软件包。

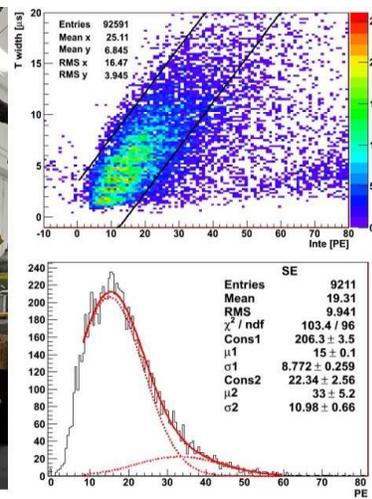
SAGE, 2021 JINST 16 T09005



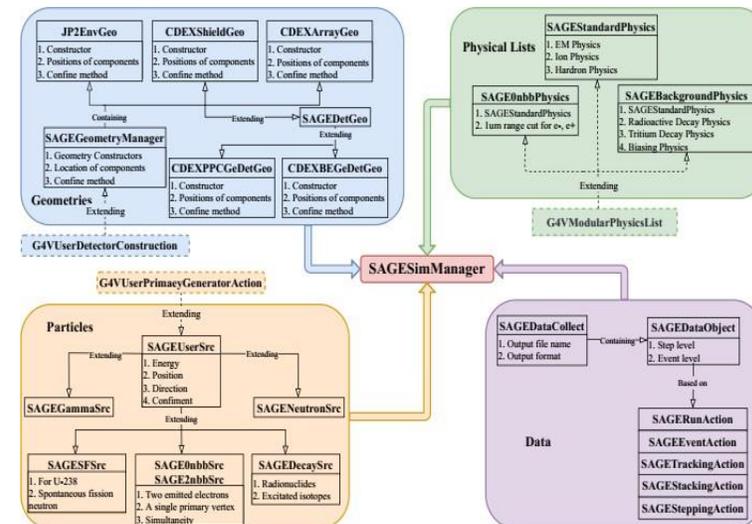
electro-form copper



LAr TPC

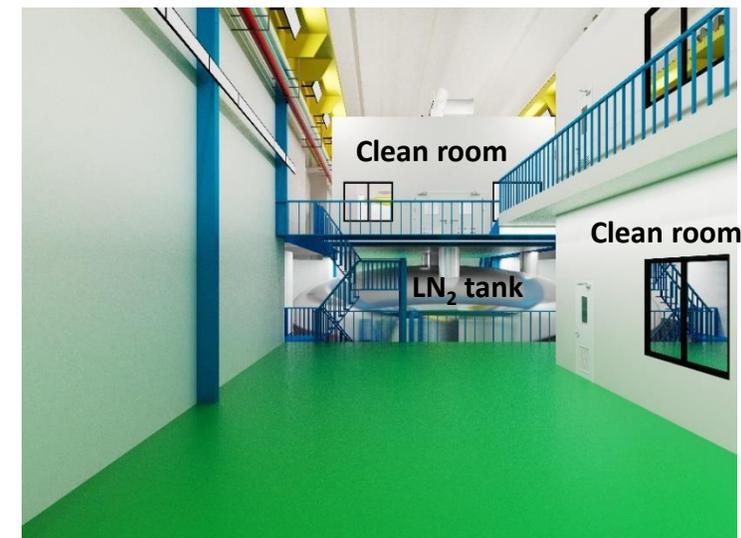


Solid Argon R&D



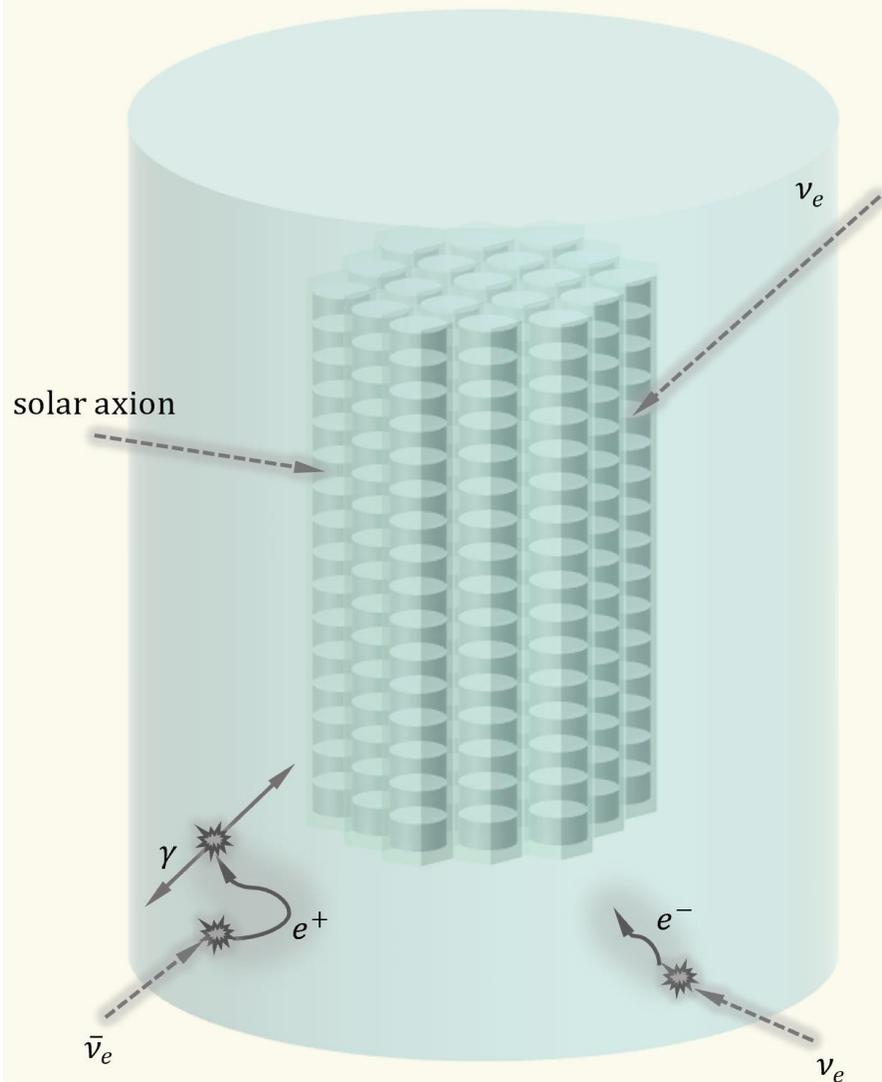
CDEX-300v实验

- 富集锗探测器测试准备 2022@CJPL-I
- 液氦反符合测试系统 2023@CJPL-I
- 大型液氮恒温器@CJPL-II C1厅将于2023年9月初步具备液氮灌注条件
- 首批富集锗探测器将于2023年9月到达锦屏地下实验室
- 探测器阵列测试 2024@CJPL-II



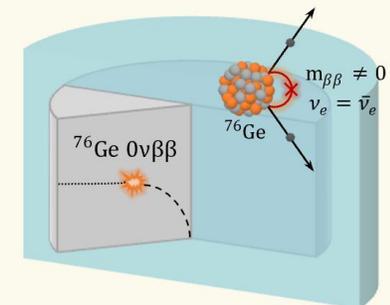
Hall C1 of CJPL-II

CDEX-300v实验（多物理目标）



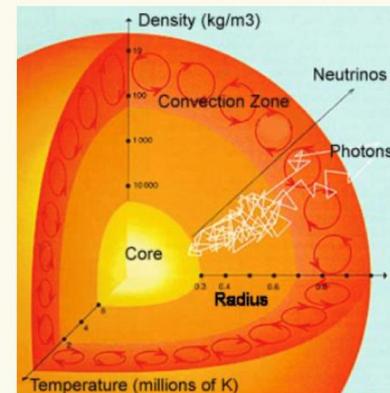
无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$)

- 轻子数不守恒过程
- 中微子的 Majorana 属性
- 中微子质量排序与绝对质量标度
- 物质-反物质不平衡



天体中微子源

- 太阳 pp / ^8B 中微子观测
- 超新星中微子观测
- 大气中微子观测



暗物质与其他超标准模型物理

- WIMPs 暗物质
 - 传统 / 加速的 WIMPs 暗物质
 - 暗物质调制效应
- 暗光子与轴子类暗物质
- 其他超标准模型物理
 - 电子衰变 ($e^- \rightarrow 3\nu$)





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-300v: 225kg富集锗@CJPL-II, 物理目标: ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ $T_{1/2} > 10^{27}$ yr, 90% C.L.;
- CDEX正在对多项关键技术进行预研:
 - (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;
 - (3) CJPL中的大型地下实验空间和极低辐射本底平台建设;
 - (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。

总结



CJPL在这座山下!



Thanks for your attention!

L.T. Yang(THU): yanglt@tsinghua.edu.cn



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>

