



清华大学
Tsinghua University



中国暗物质实验（CDEX）和锦屏地下实验室（CJPL） 研究和建设进展及展望

清华大学
岳骞

2021年8月26日



中国暗物质实验
China Dark matter EXperiment

Symposium on Nuclear Physics Frontiers and Intersections
香山饭店·北京
2022年8月26日



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



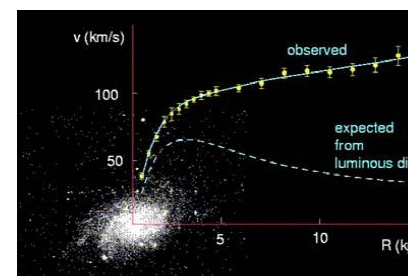
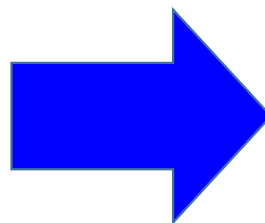
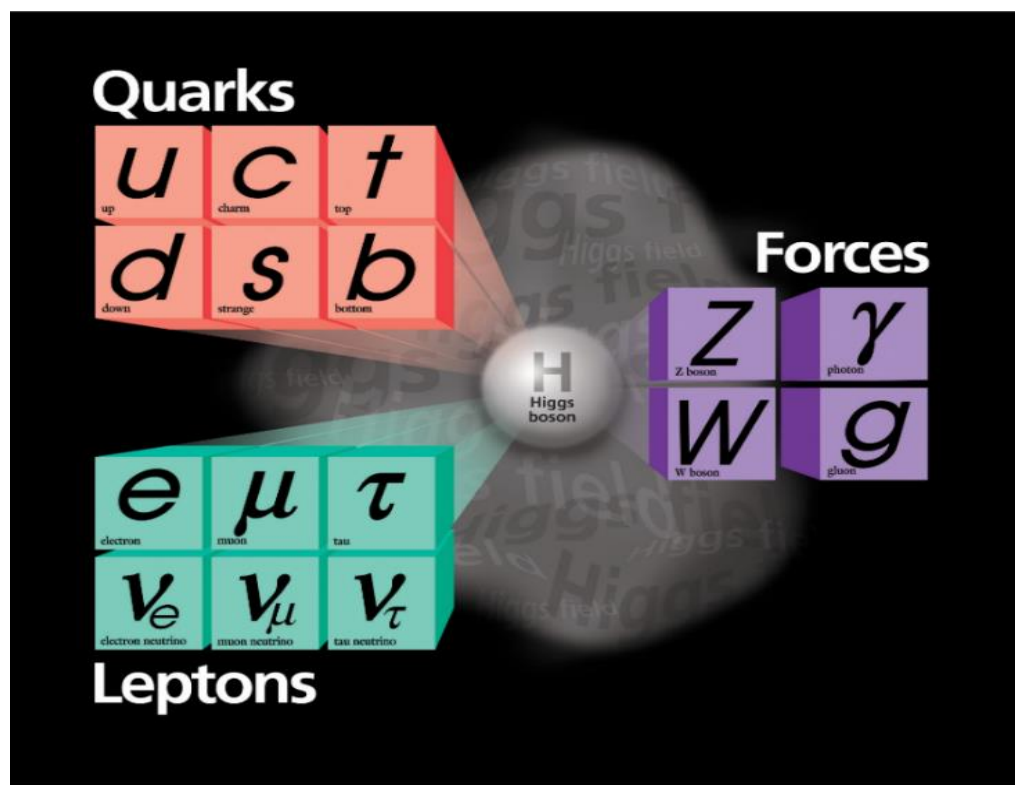
报告内容

- 物理学重大前沿科学问题——暗物质和中微子
- 国际地下实验室和中国锦屏地下实验室（CJPL）
- 国际深地DM和 $0\nu\beta\beta$ 研究进展
- CDEX研究进展和未来计划
- 总结



物理学重大前沿科学问题----暗物质

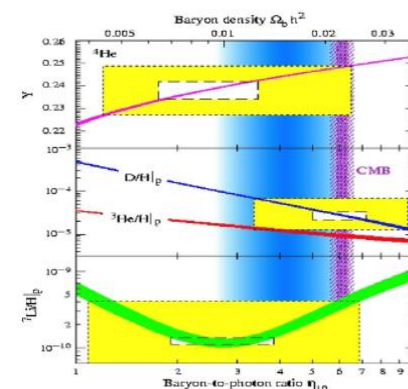
- 过去数十年，粒子物理标准模型取得巨大成功，并日趋完善；
- 但标准模型无法对暗物质问题给出合理解释；
- 暗物质问题超出粒子物理标准模型的新物理的重要方向。



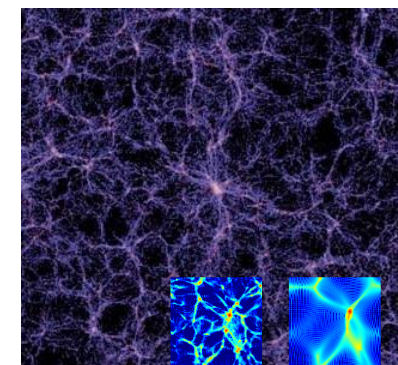
星系旋转曲线



子弹星云

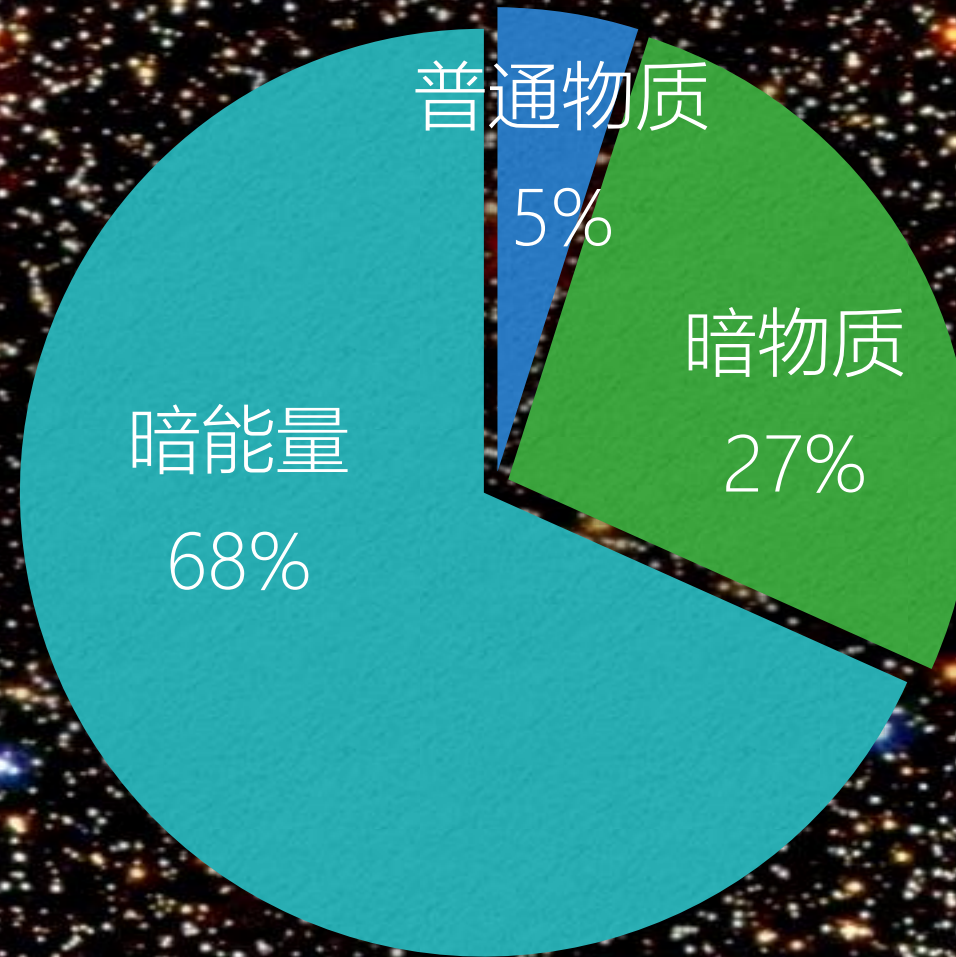


大爆炸核合成



宇宙大尺度结构

宇宙构成





暗物质候选者

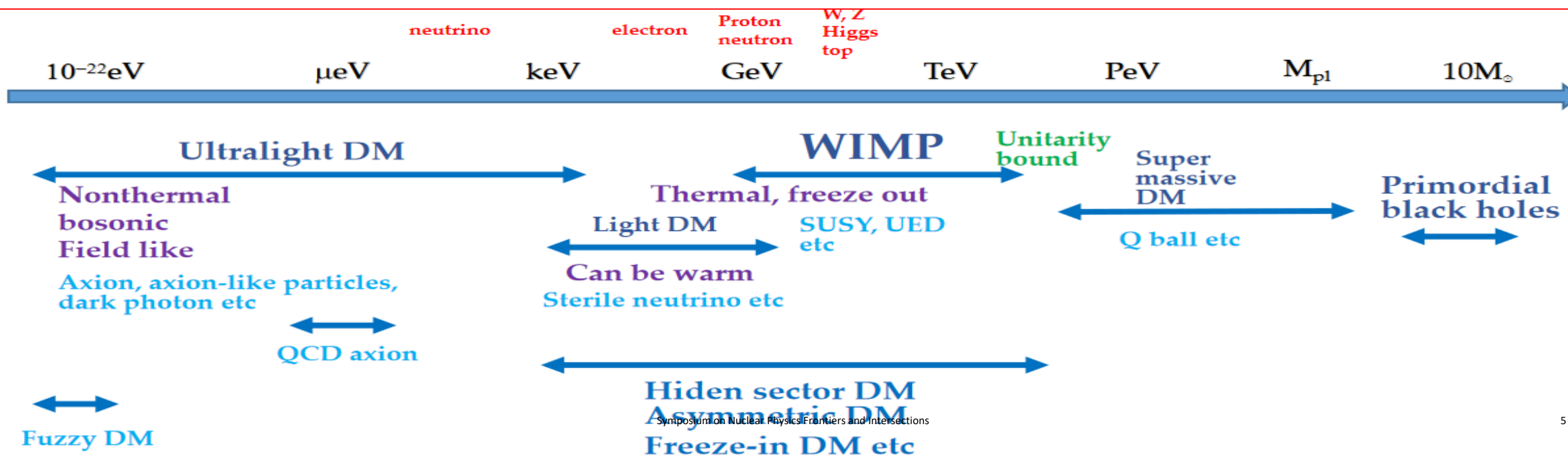
Dark Matter 基本特点

1. 有质量（参与引力作用）
2. 稳定粒子（寿命长于宇宙年龄）
3. 不带电荷（基本无电磁相互作用）
4. 非重子物质（不由夸克组成）
5. 非相对论性运动（冷暗物质）

DM 非任何已知基本粒子！

- 原初黑洞： 10^{40} - 10^{55} GeV
- 超重暗物质WIMPzilla: 10^{15} GeV
- 常规 WIMPs：1 GeV- 1 TeV
- 轻DM 粒子 (keV) Sterile neutrinos
- 极轻暗物质 (10^{-10} - 10^{-22} eV)

Axion and Axion-like particles, Fuzzy DM



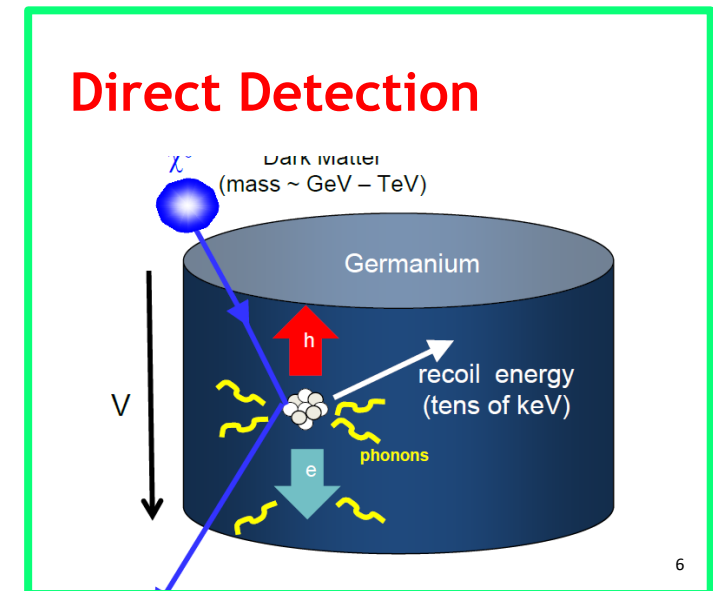
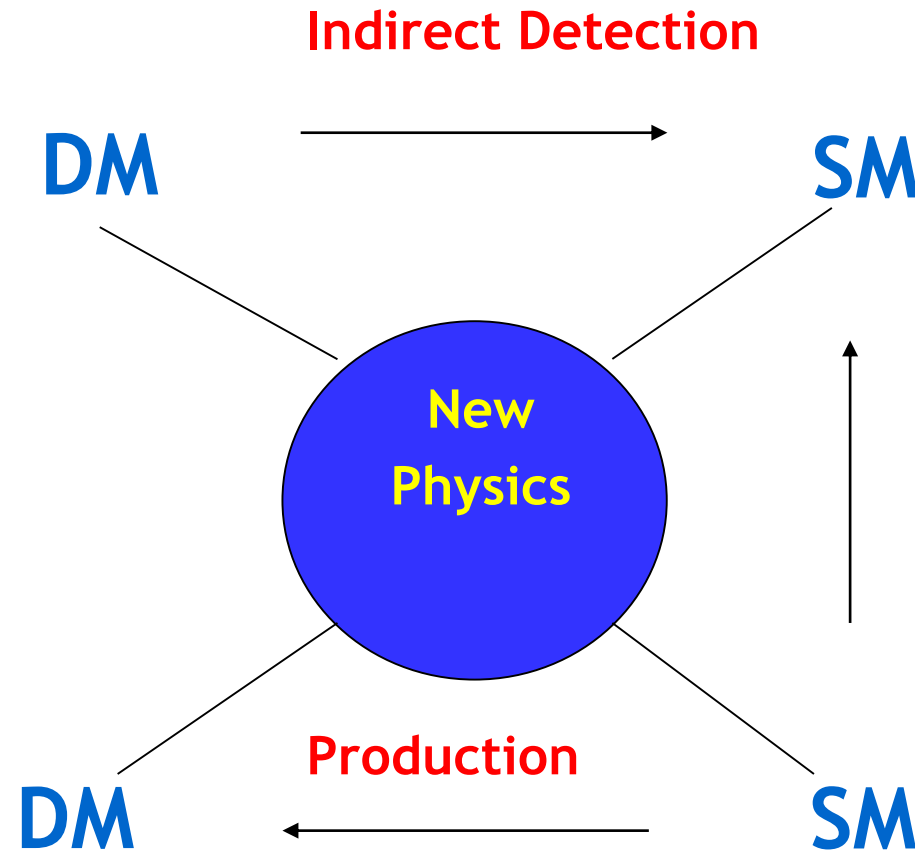


暗物质实验探测

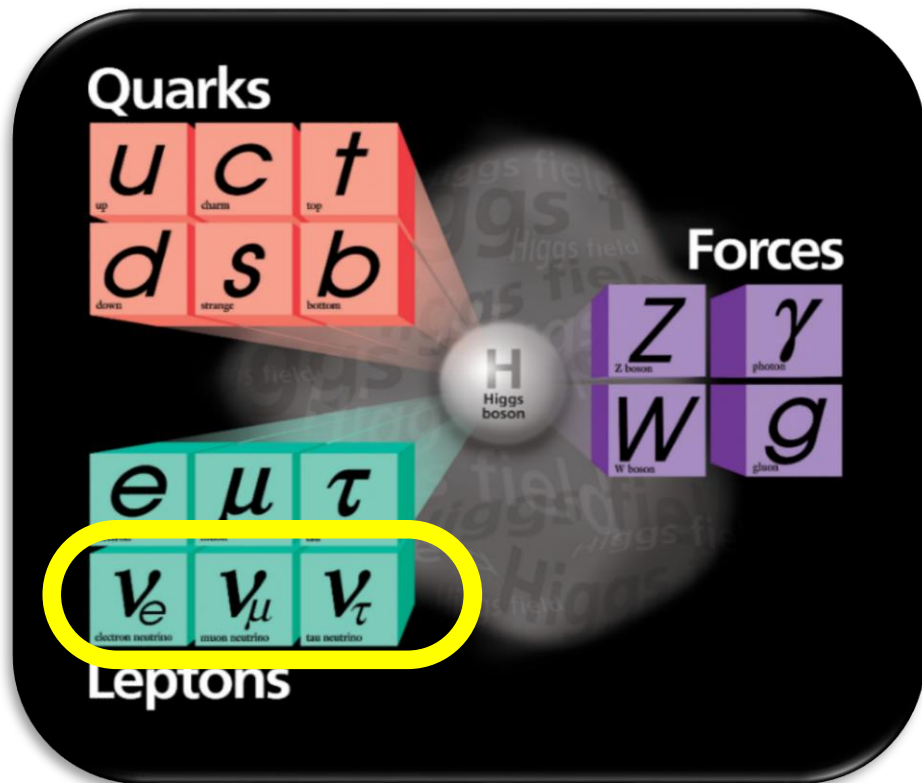
直接探测主要目标：

- WIMP;
- Sub-GeV DM;
- Axion and ALP;
- Dark photon;
-

• 研究方法



物理学重大前沿科学问题----中微子



Takaaki Kajita



2015



Arthur B. McDonald

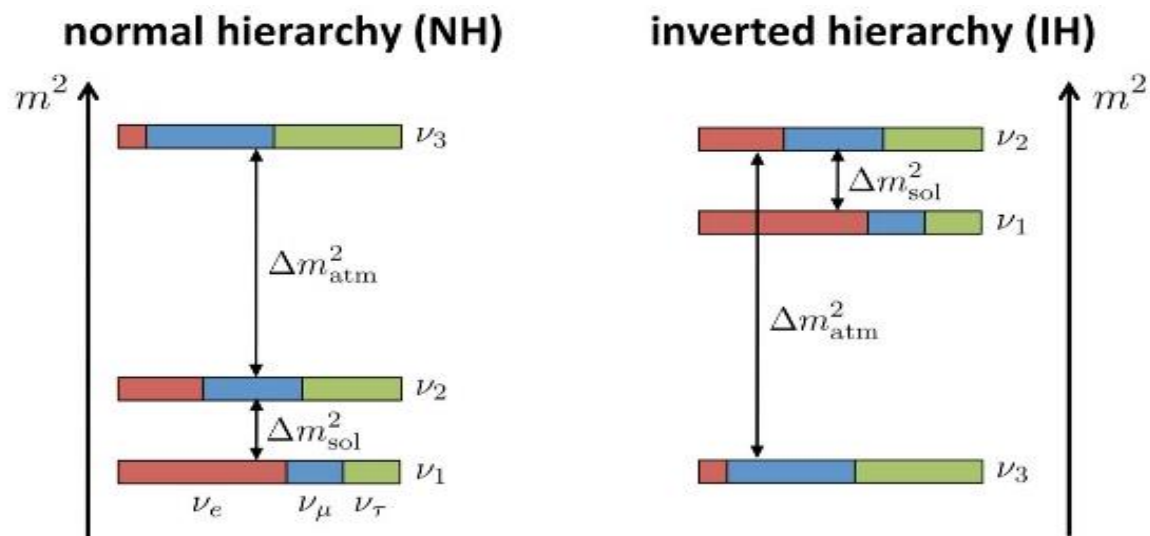
“For the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”

- 粒子物理标准模型中， $m_\nu=0$ ；
- 中微子研究四次获得诺贝尔物理学奖。

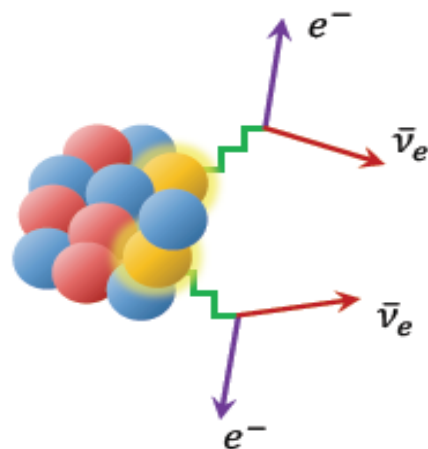
- 中微子振荡实验给出 $m_\nu \neq 0$ 的实验证据，开启了中微子研究新局面；
- 无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$) 实验是中微子研究最为重要课题之一。

“ $0\nu\beta\beta$ ” 实验的三大科学目标

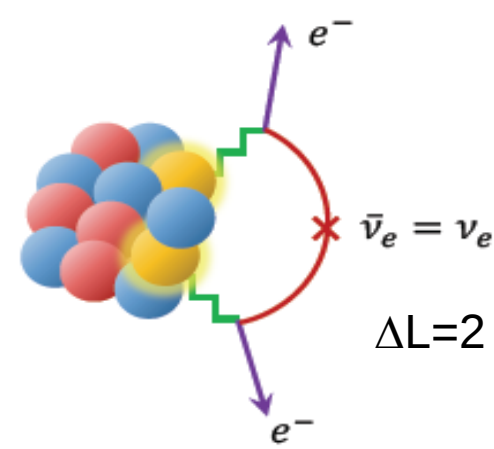
- 一、确定中微子质量顺序（正序还是反序）；
- 二、检验中微子是否是自身的反粒子；
（“ $0\nu\beta\beta$ 实验”是解决该问题的唯一可行方法）
- 三、测量破坏轻子数守恒的新物理现象。



中微子质量可能的顺序



$2\nu\beta\beta$

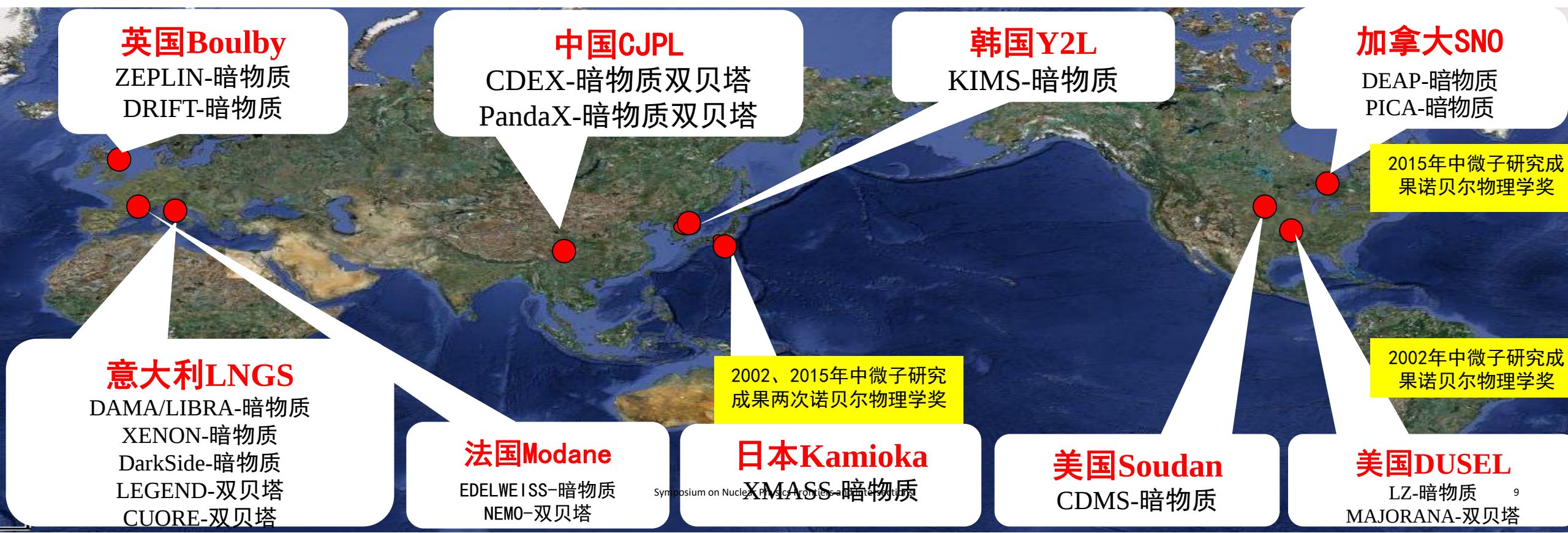


$0\nu\beta\beta$



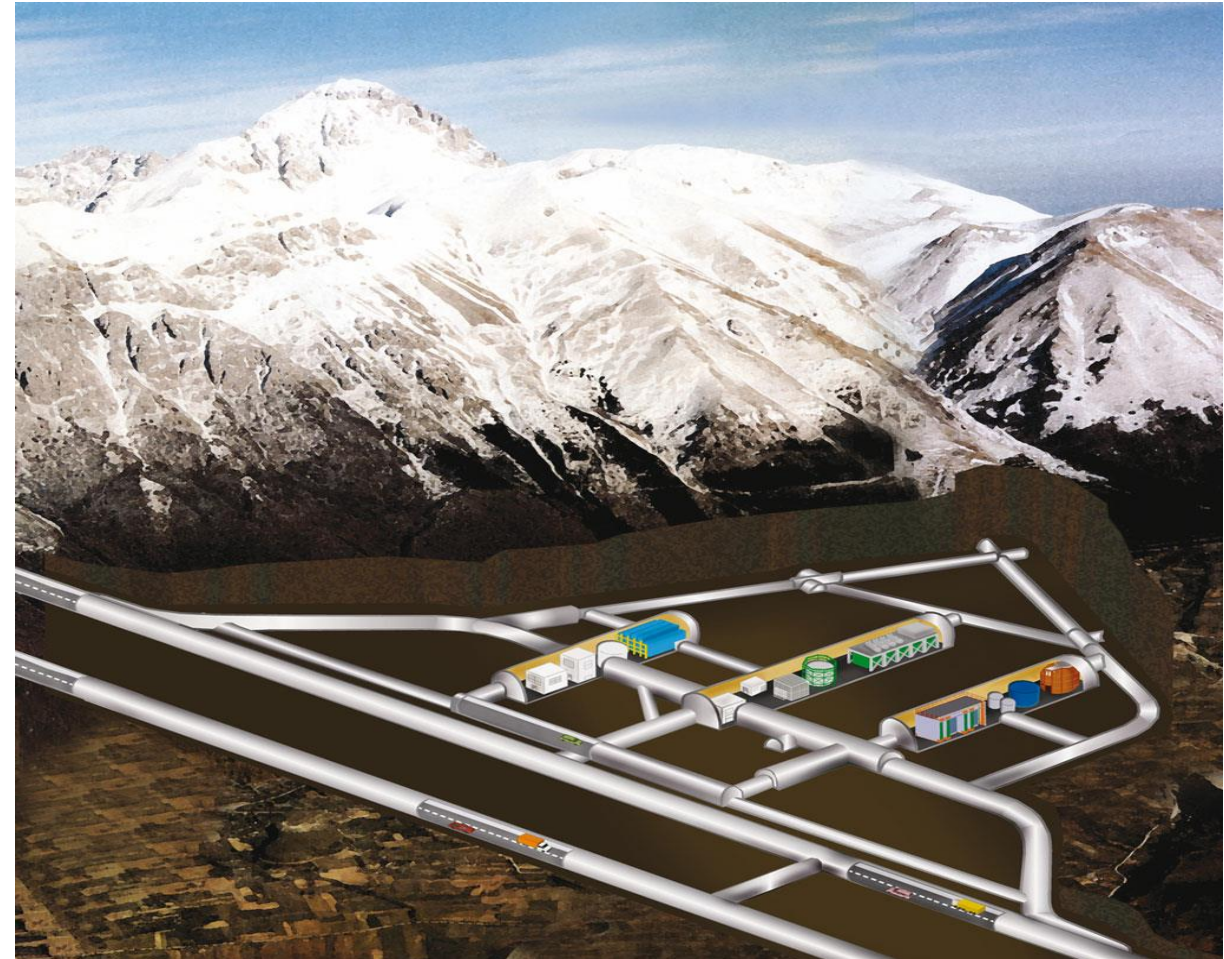
国际地下实验室

- **地下实验室**是重要的一个国家极为重要的粒子物理与核物理实验平台；
- **暗物质直接探测**与 $0\nu\beta\beta$ 实验需要在深地实验室开展，以屏蔽宇宙线；
- 中国锦屏地下实验室是世界岩石覆盖最深的地下实验室，具有优势。



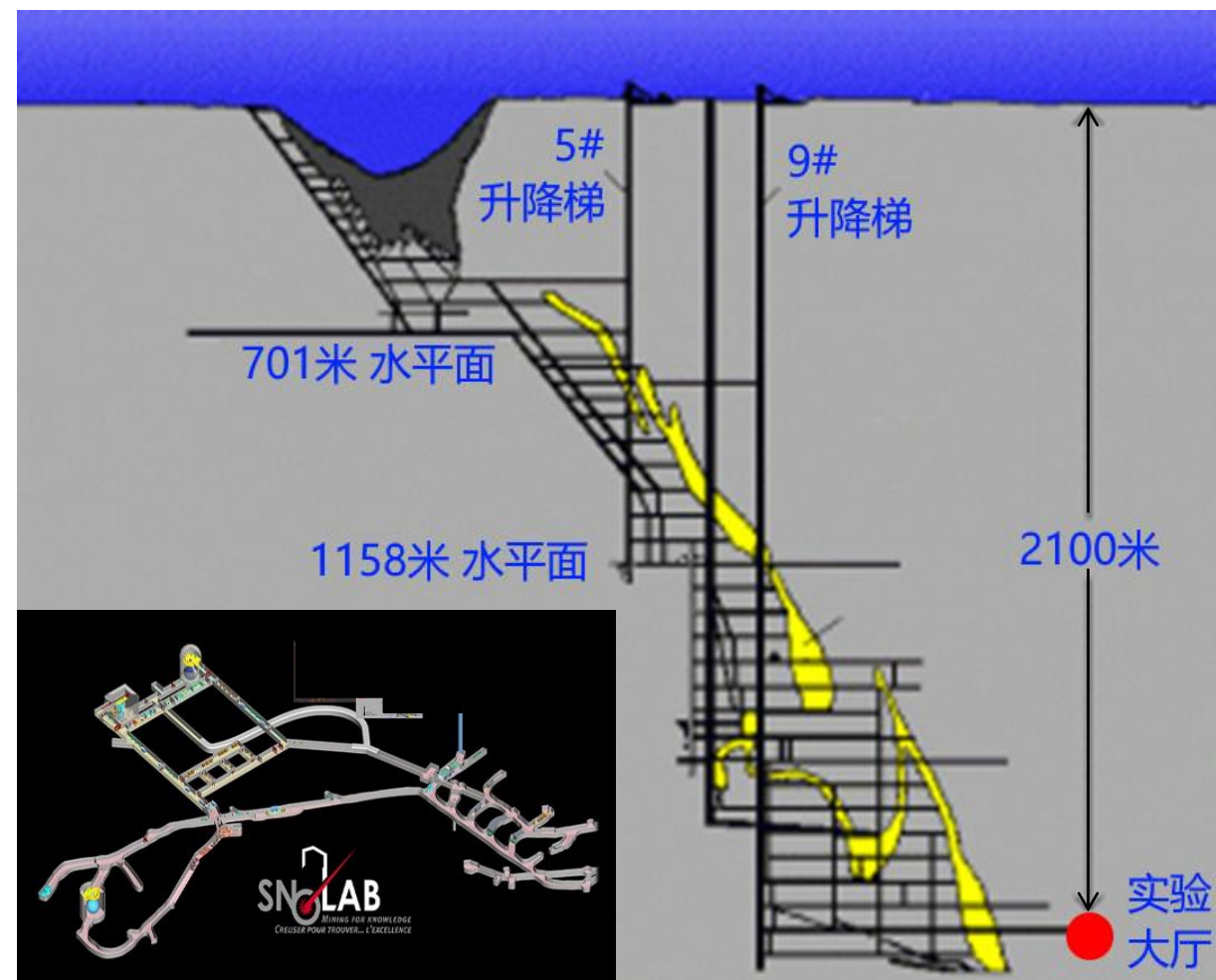
意大利格兰萨索地下实验室

- CJPL建设之前国际最大的地下实验室。
- 空间18万立方米，岩石覆盖厚度1400米，隧道型；
- 主要开展的物理实验：
 - 暗物质: **XENON**、**CRESST**等
 - 双贝塔衰变: GERDA、CUORE 等
 - 太阳中微子: Borexino等
 -



加拿大斯诺地下实验室

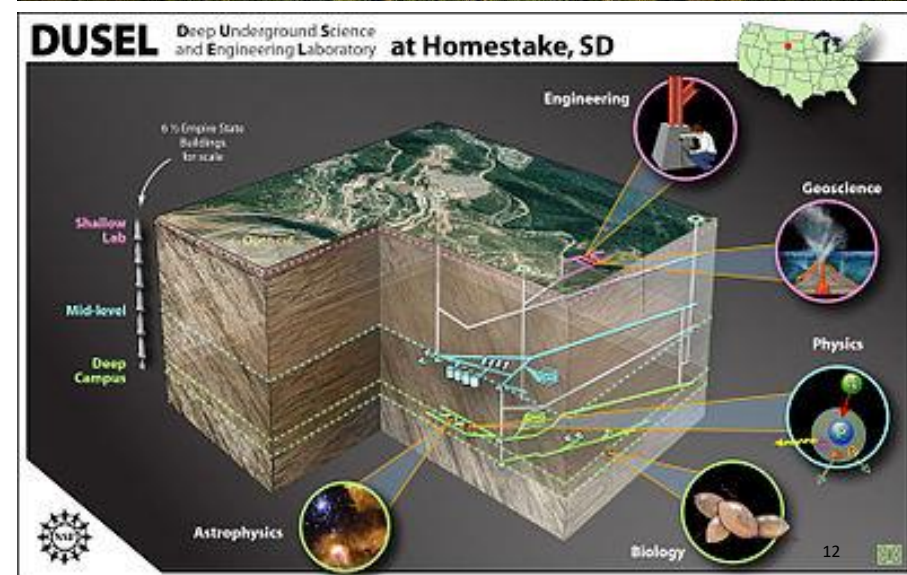
- CJPL建设之前世界最深的地下实验室；
- 深度2100米，空间5万立方米，矿井型；
- 主要开展实验：
 - 暗物质：SuperCDMS...
 - 双贝塔：nEXO
 - 中微子：SNO+、
 - 超新星中微子：HALO
 - 深部岩石地震信号：POLARIS
 -





美国圣福德（Sanford）地下实验室

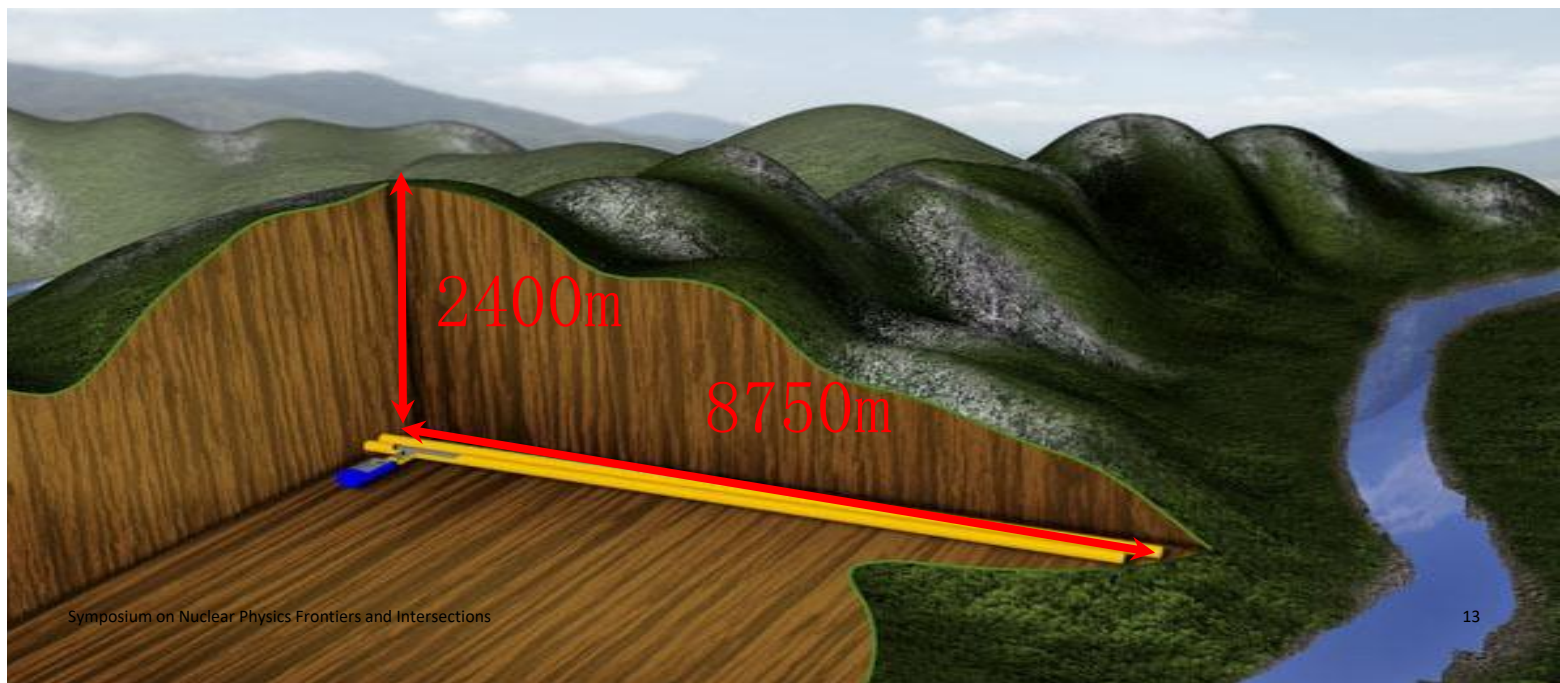
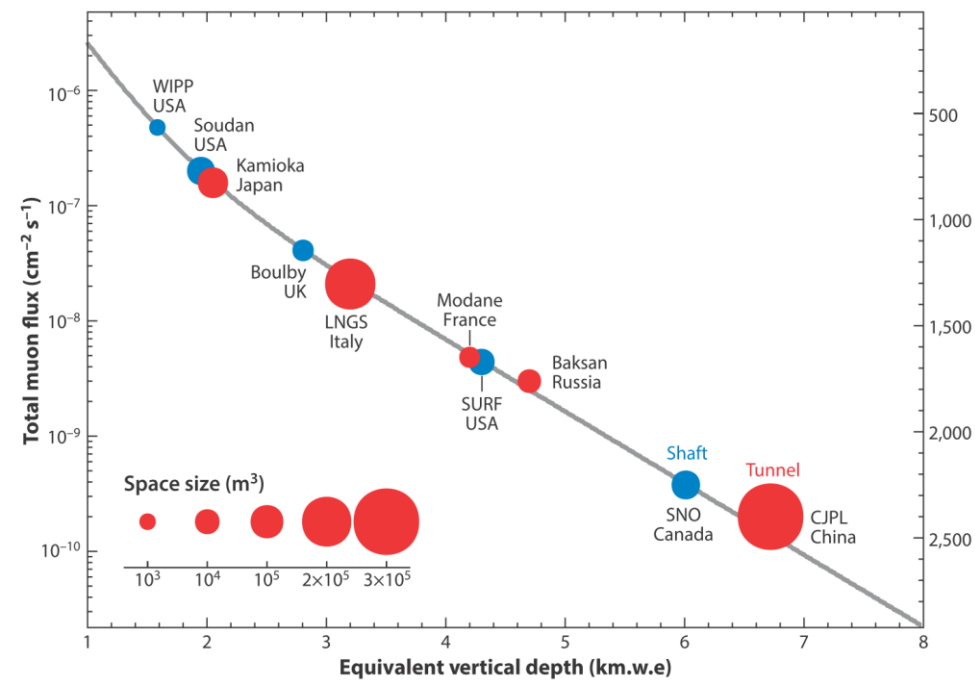
- 深度1500米，空间2万 m^3 ，矿井型；
- 主要开展实验：
 - 暗物质: LZ
 - 双贝塔: Majorana
 - 中微子: DUNE
- 曾计划6.4亿美元建设深度为2300m的DUSEL深地实验室，2008年计划取消；
- 目前计划在1500m深度的地下空间建设长基线中微子探测系统。



中国锦屏地下实验室 (CJPL)



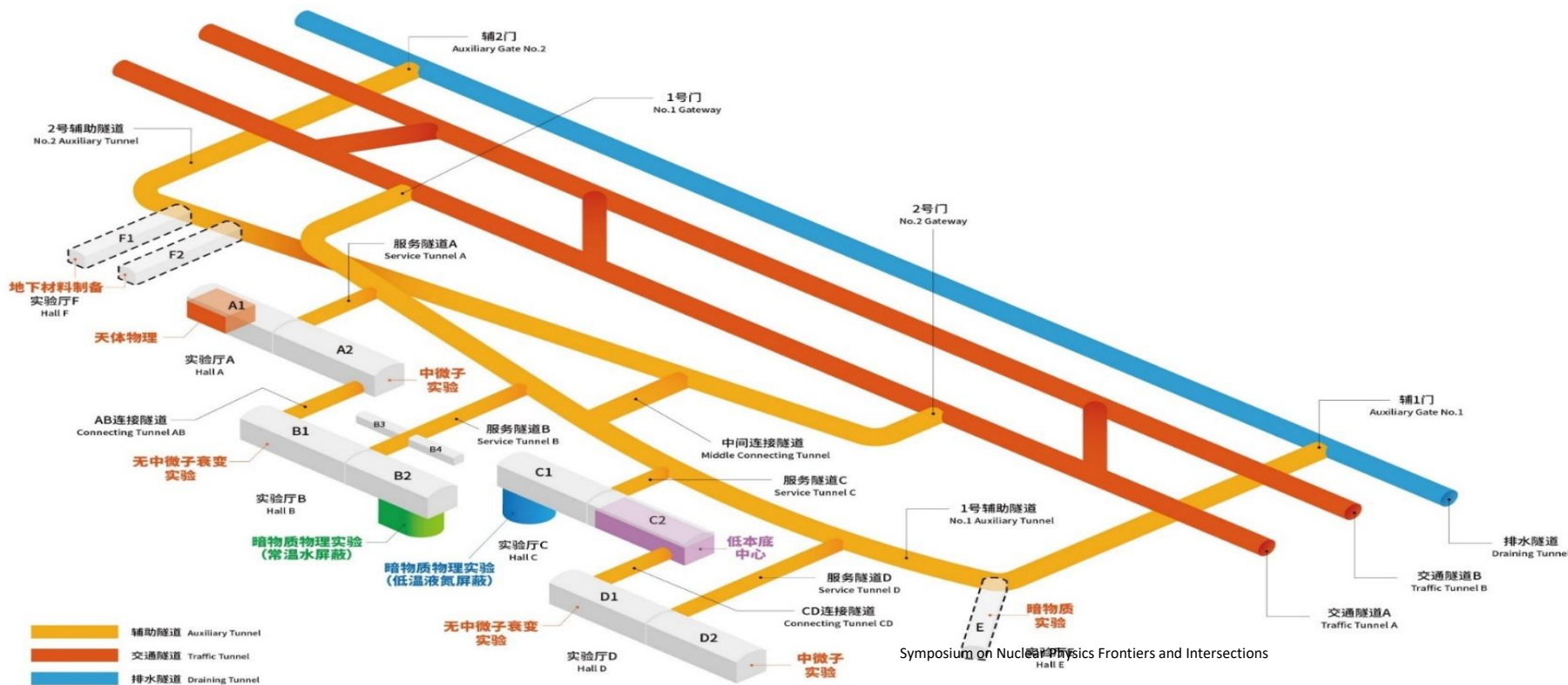
- 清华大学联合雅砻江流域水电开发有限公司积极推动CJPL的建设。CJPL位于四川凉山州锦屏山下，隧道型，开车出入，综合条件一流；
- 当前实验：**CDEX**、**PandaX**、**JUNA**、**锦屏中微子实验**等，已经取得了一系列重要前沿成果；
- CJPL-II正在建设“国家重大科技基础设施”，目标是世界级深地实验平台。





基于CJPL建设国家重大科技基础设施

- 2020年启动建设国家重大科技基础设施，总容积 ~ 30 万 m^3 ，共8个实验厅；
- 2023年开始，具备实验组入驻的基本条件，2024年底建成；
- 世界最深、空间最大，综合条件一流，成为国际深地前沿研究重要基地。



Symposium on Nuclear Physics Frontiers and Intersections



我国深地中微子暗物质研究计划



- **CDEX (^{76}Ge 富集锗阵列探测器)**：无中微子双贝塔衰变+暗物质探测
- **PandaX (液氙TPC探测器)**：暗物质探测+无中微子双贝塔衰变实验
- **CUPID-China (^{100}Mo 钼酸锂低温量热器)**：无中微子双贝塔衰变实验
- **NvDEX (^{82}Se 高压气体TPC技术)**：无中微子双贝塔衰变实验
- **锦屏中微子实验**：太阳中微子和地球中微子探测实验

国际深地前沿研究（DM）

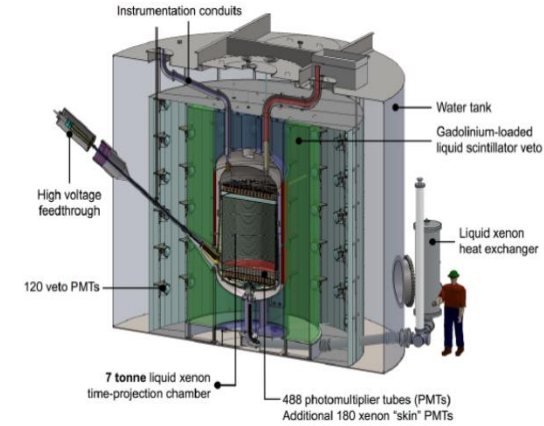


实验技术	主要关注能区	实验名称	实验地点	探测器介质	介质质量	靶质量	灵敏区质量	下一阶段	挑战
半导体	10GeV以下	CDEX	CJPL	Ge	1kg * 50	50 kg	50 kg	1T	✓本底 ✓阈值 ✓成本
		EDELWEISS	SNOLab	Ge	4 kg	4 kg	100 kg	1T	
		SuperCDMS	SNOLab	Ge、Si	50 kg	50 kg	50 kg		
		DAMIC	SNOLab	Si（SCCD）	6 g * 7	6 g * 7	6 g * 7	~1kg	✓本底 ✓靶质量
		SENSEI	FNAL	Si（SCCD）	~1 g	---	---	~100g	
液态惰性气体	10GeV以上	LZ	Surf	LXe	10 Ton	7 Ton	~5.6 Ton	30T - 100T 300T	✓技术 ✓氦本底 ✓阈值 ✓成本
		PandaX	CJPL	LXe	6 Ton	4 Ton	~3 Ton		
		XENON	LNGS	LXe	8.6 Ton	5.9 Ton	~4 Ton		
		Darkside	LNGS	LAr	50 Ton	46 Ton	25 Ton		
晶体低温量热	10GeV以上	CRESST	LNGS	CaWO ₄	300g -> 24g 10个单元	240g	240g	——	✓本底 ✓阈值

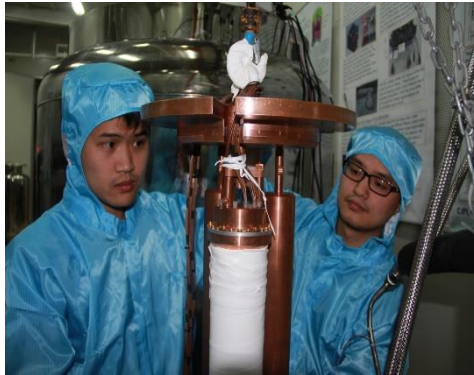
暗物质直接探测国际形势



国外



国内



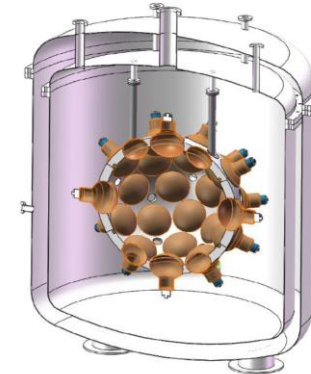
10GeV以下
轻质量区

锆——清华大学



10~500GeV
中重质量区

液氙——上交大



100~1000GeV
重质量区

液氩——高能所



暗物质直接探测国际形势

高纯锗轻质量暗物质探测：

- 中国“盘古” CDEX：10kg实验结束运行，在建50公斤；
- 美国SuperCDMS：9kg实验结束运行，在建50kg。

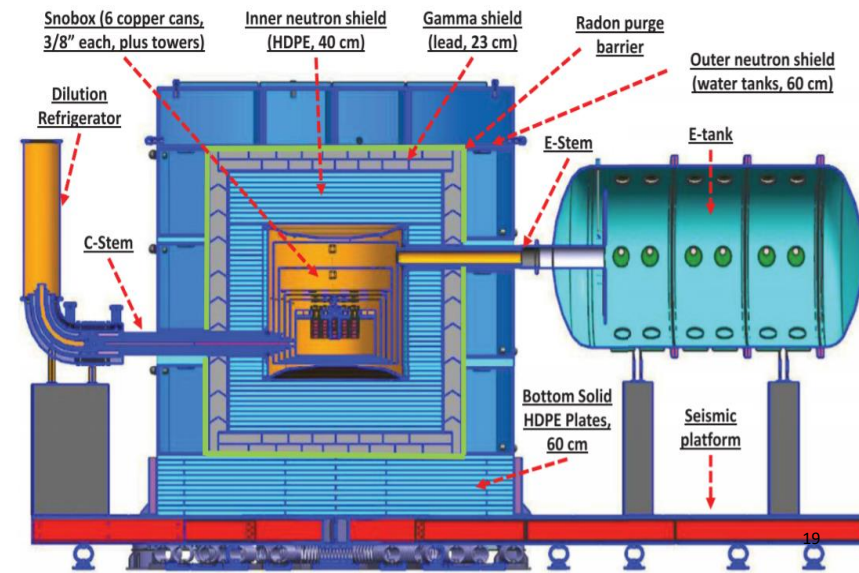
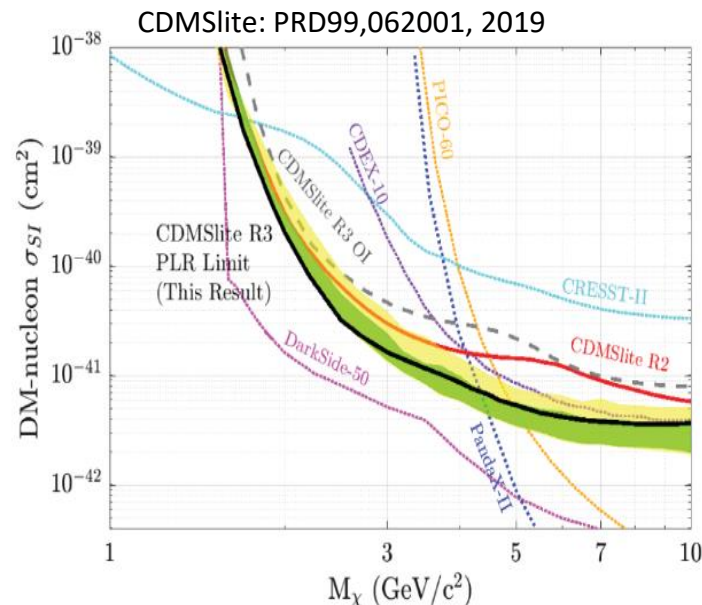
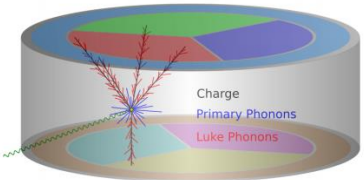
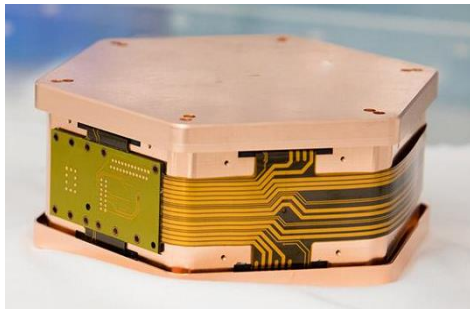
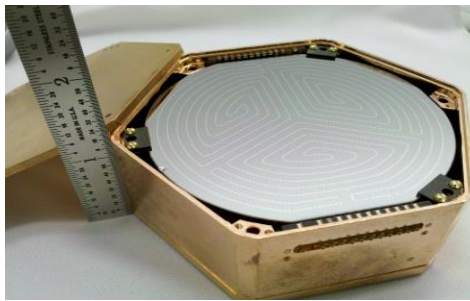
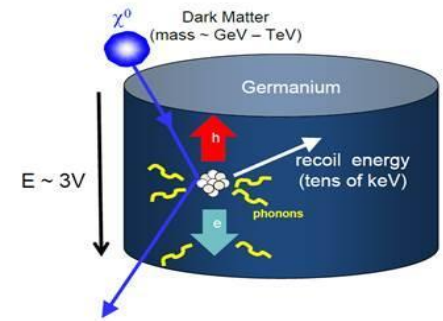
液氙/液氙重质量暗物质探测：

- 美国LZ：7吨有效液氙运行（刚公布最新结果，国际最好）
- 欧美XENONnT：5.9吨有效液氙测试运行；
- 中国PandaX：3.7吨有效液氙测试运行；
- 欧美DarkSide：20吨液氙，预计2023年运行（中国参与）。

美国SuperCDMS暗物质实验



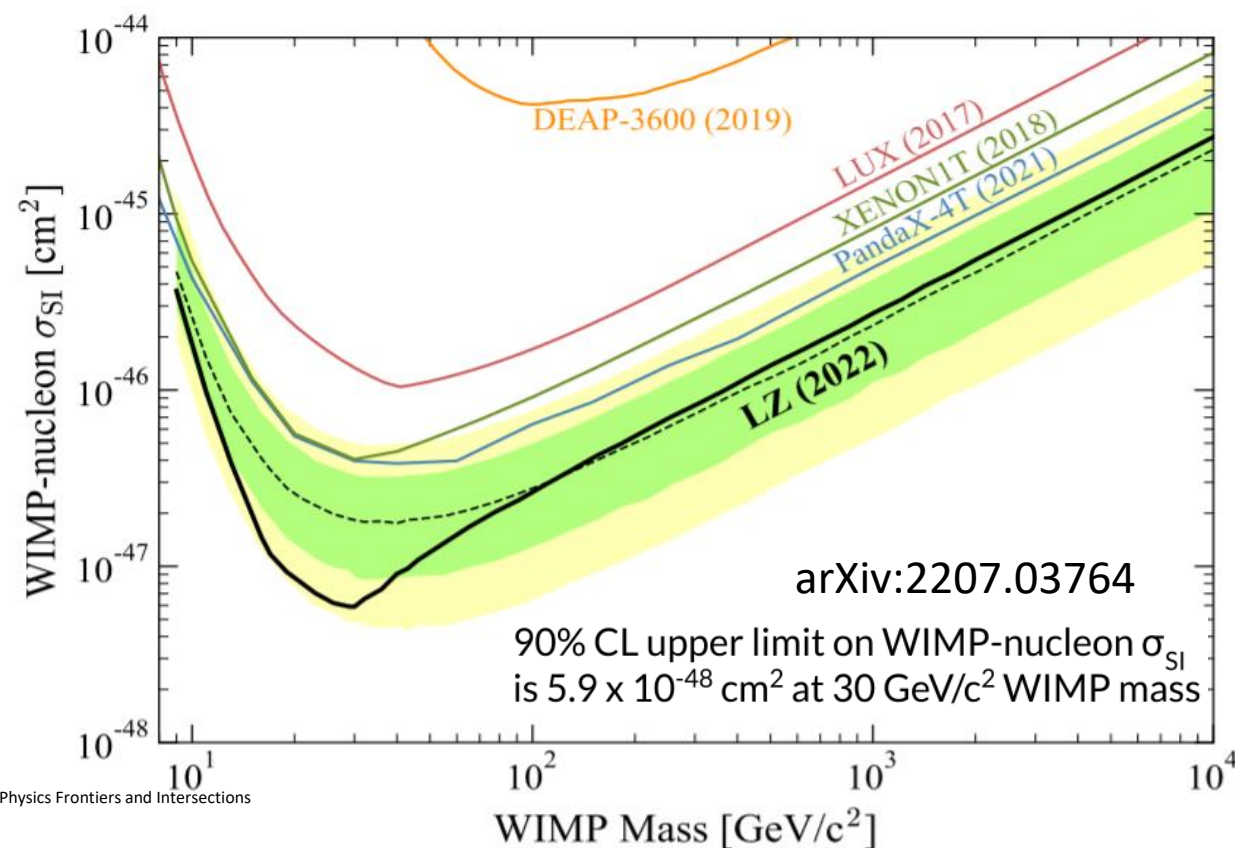
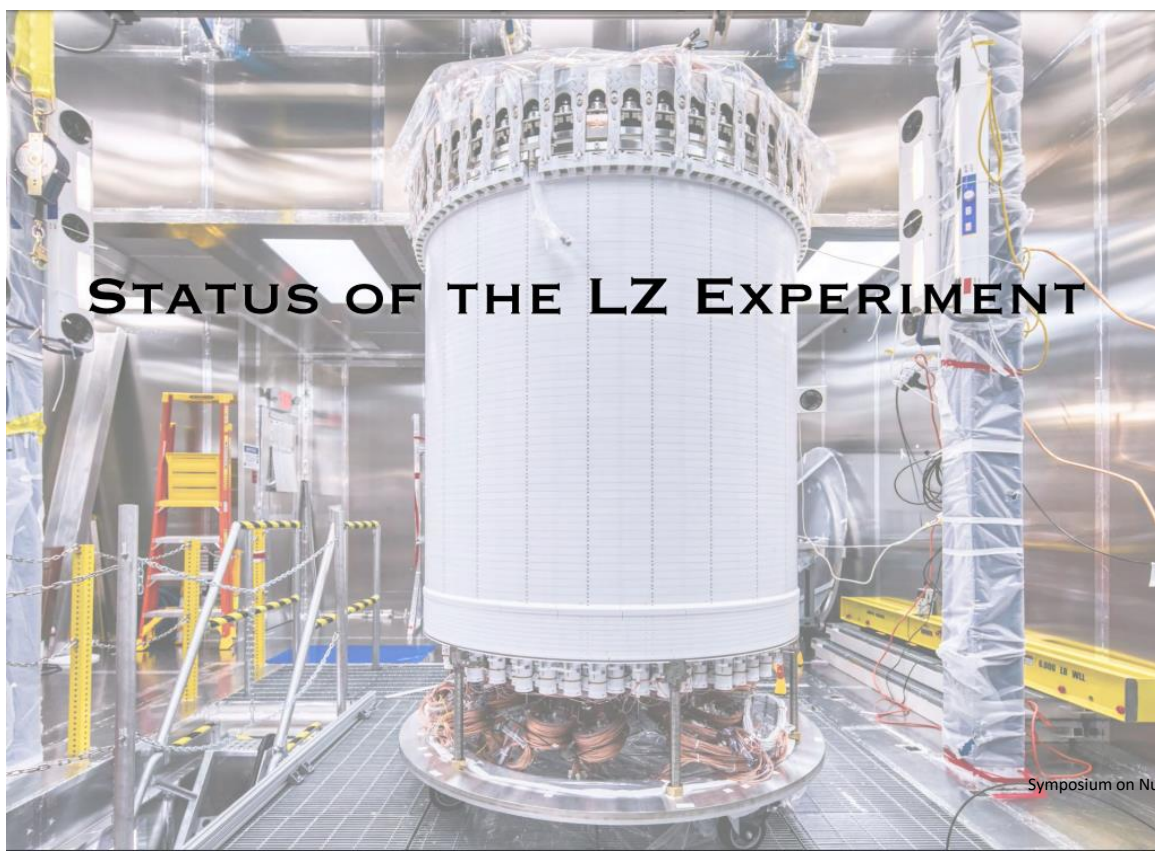
- SuperCDMS在美国Soudan，目前在SNOLab建设新一代探测系统；
- 几十mK极低温Ge探测器：同时探测电荷信号和声子信号；
- 可以只探测声子信号，以降低阈值（CDMSLite）；
- 利用Luke效应进一步放大声子信号，降低阈值，瞄准轻质量暗物质。



美国LZ实验级最新结果



- 2022年7月7日LZ发布最新暗物质成果，给出了液氙暗物质实验最灵敏实验结果；
- 液氙质量：10t；灵敏质量：7t；有效质量5.5t；60天实验数据；
- WIMP探测灵敏度： $5.9 \times 10^{-48} \text{cm}^2 @ 30 \text{GeV}/c^2$ （当前国际最好）



国际深地前沿研究（ $0\nu\beta\beta$ ）



核素	探测技术	实验组	当前 $T_{1/2}$ (年)
$^{76}_{32}\text{Ge}$	液氩反符合富集锗阵列技术	CDEX、LEGEND	1.8×10^{26}
^{82}Se	高压TPC+TOPMetal	NvDEx	—
^{100}Mo	低温量热技术	CUPID、CUPID-China、AMoRE	—
$^{130}_{52}\text{Te}$	低温量热技术	CUREO	1.5×10^{25}
	掺杂液体闪烁探测技术	SNO+, JUNO- $0\nu\beta\beta$ -Te	计划2030年开始
$^{136}_{54}\text{Xe}$	掺杂液体闪烁探测技术	KamLand-Zen	1.07×10^{26}
		JUNO- $0\nu\beta\beta$ -Xe	计划2030年开始
	液态富集 ^{136}Xe	EXO	1.8×10^{25}
	气态富集 ^{136}Xe	PandaX-III	
	液态天然Xe 技术	PandaX-xT	
		DARWIN	

高纯锗 $0\nu\beta\beta$ 实验

- 利用富集 ^{76}Ge 探测器阵列开展无中微子双贝塔衰变实验，以及暗物质直接、太阳中微子探测等多科学目标的实验研究。

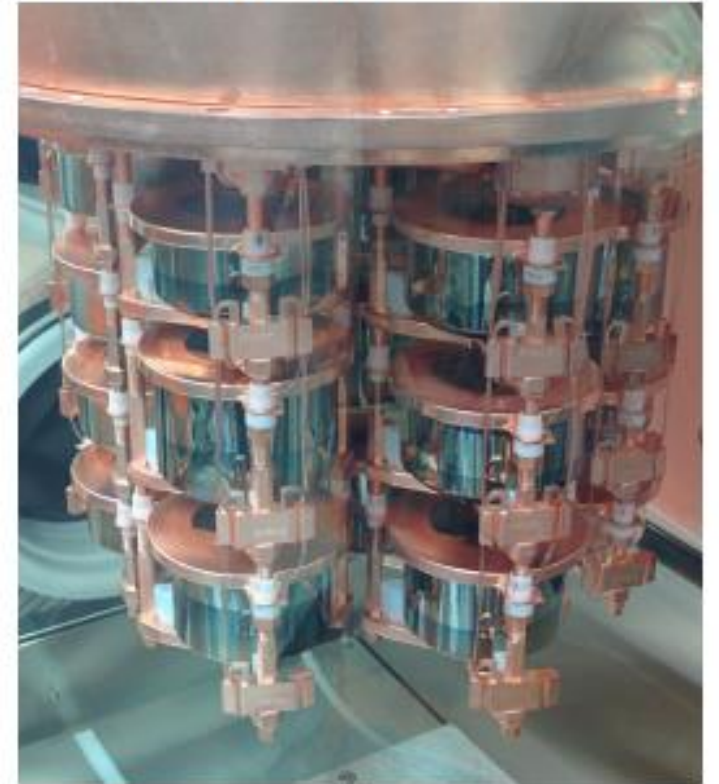
CDEX-1



GERDA Phase II



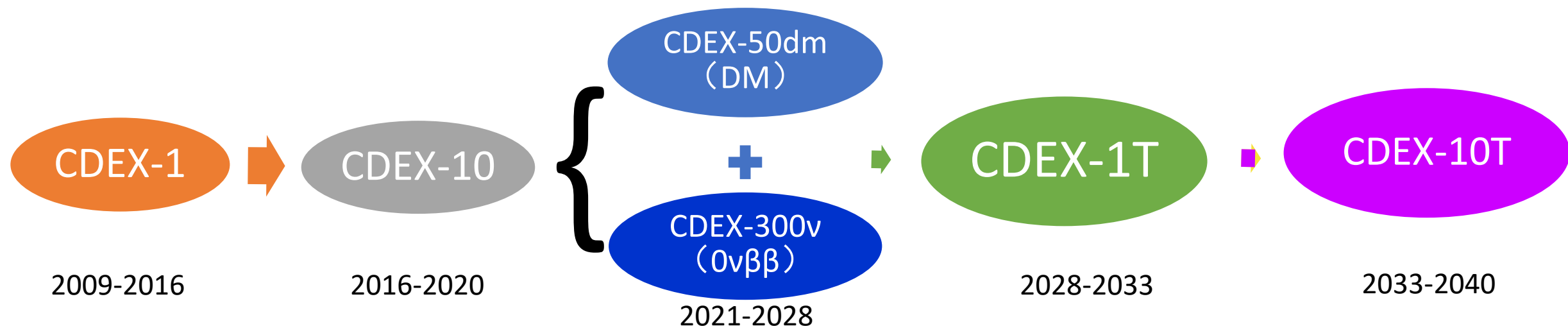
MAJORANA DEMONSTRATOR





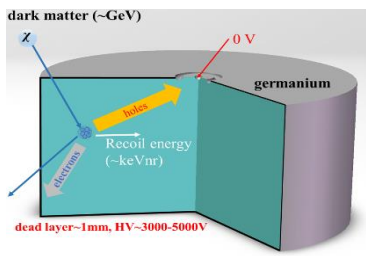
CDEX合作组

- 2009年由清华大学牵头成立，11个合作单位，超过100位合作组成员；
- 利用高纯锗技术，主要开展暗物质探测和中微子实验研究。

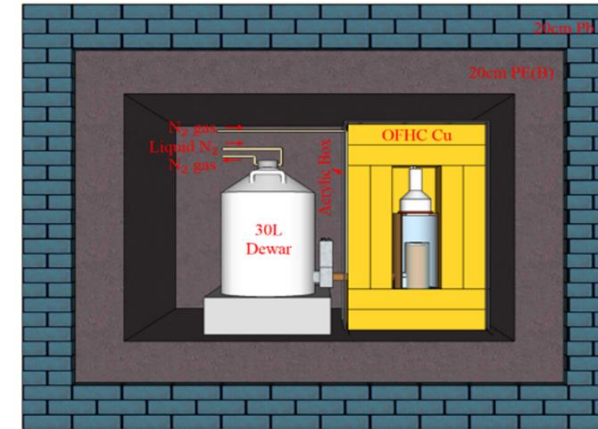




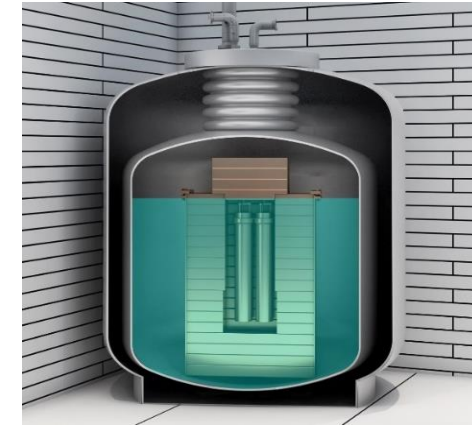
CDEX-1和CDEX-10实验装置



CDEX-1 inside PE room



CDEX-1A/B (2011-2018)
2 x PPC(~1 kg)

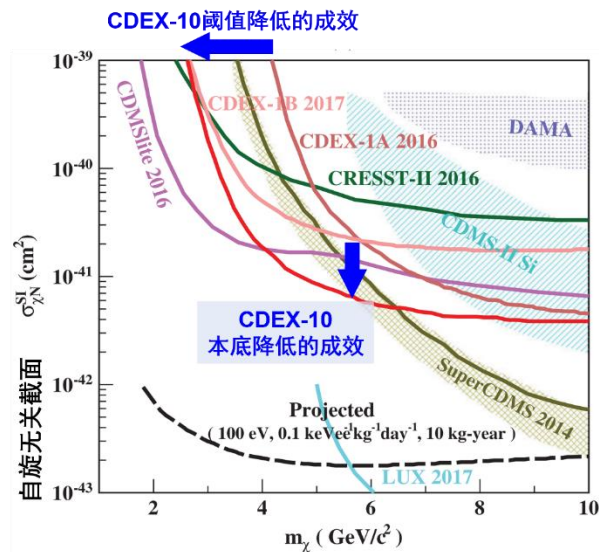


CDEX-10 (2016-)
10 kg 真空封装阵列
液氮直接浸泡

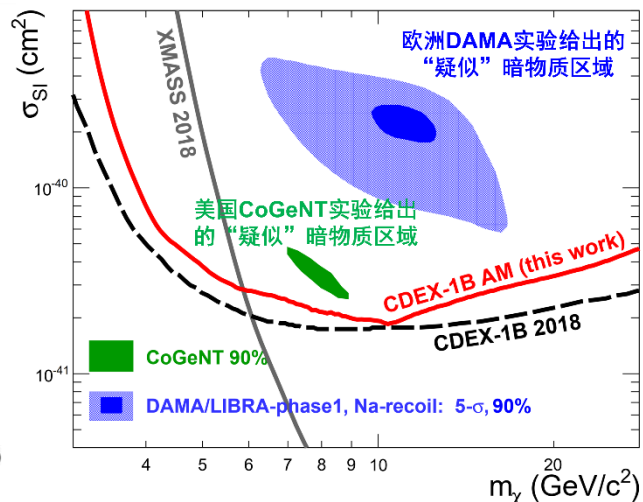
- **CDEX-1:** Development of **PPC Ge detector**, bkg understanding, since 2011;
- **CDEX-10:** Performances of **Ge array detector** immersed in LN_2 , since 2016;
- **CDEX-10X:** **Home-made Ge** detector and Ge crystal growth.

CDEX 代表性物理成果

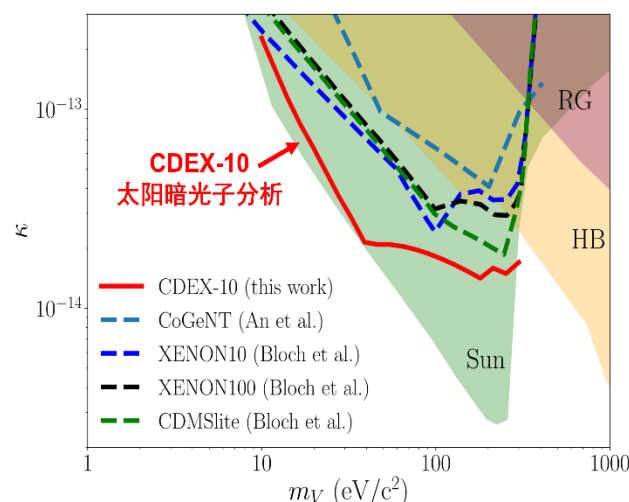
- 2018年发表4-5GeV区间自旋无关国际最灵敏实验结果；
- 年度调制效应研究：6 GeV以下暗物质年度调制灵敏度限制达到世界最好水平；
- 暗光子暗物质研究：10-300eV质量区间暗光子动量混合参数限制国际最好；
- 2017年发表我国首个 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变实验结果。



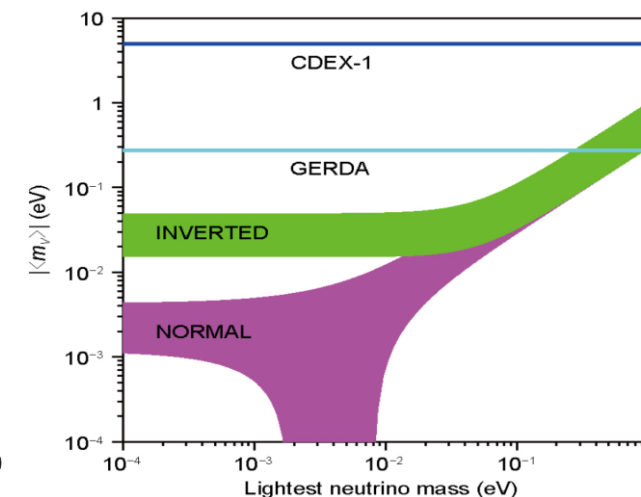
PRL 120, 241301 (2018)



PRL 123, 221301 (2019)



PRL 124, 111301 (2020)



Science China PMA (2017)
60: 071011

CDEX系列物理成果

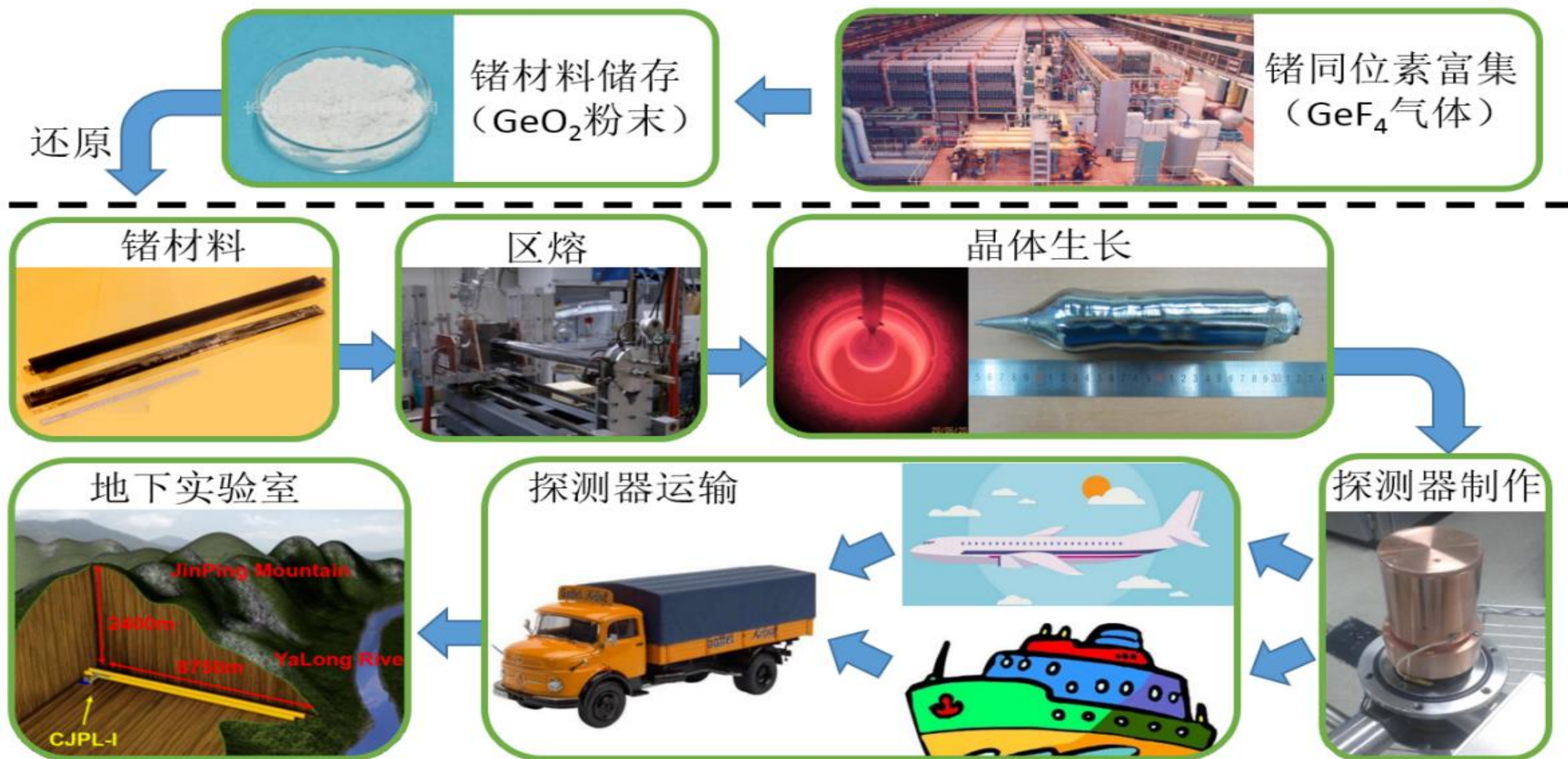


从2013年发表我国第一个暗物质直接探测实验成果，到当前国际“并跑”。

Physics Channels	Detectors	Analysis Threshold (eV)	Exposure (kg-day)	Publications
WIMP-nucleon SI	CDEX-1A	400	14.6	PRD 88, 052004, 2013
WIMP-nucleon SI	CDEX-20g	177	0.784	PRD 90, 032003, 2014
WIMP-nucleon SI	CDEX-1A	475	53.9	PRD 90, 091701, 2014
WIMP-nucleon SI/SD	CDEX-1A	475	335.6	PRD 93, 092003, 2016
Solar Axion and ALPs	CDEX-1A	475	335.6	PRD 95, 052006, 2017
$0\nu\beta\beta$	CDEX-1A	---	304.0	Sci. China 60, 071011, 2017
WIMP-nucleon SI/SD	CDEX-1B	160	737.1	CPC42, 023002, 2018
WIMP-nucleon SI/SD	CDEX-10	160	102.8	PRL 120, 241301, 2018
Sub-GeV WIMP-nucleon SI, Migdal Effect	CDEX-1B	160/250	737.1/1107.5	PRL 123, 161301, 2019
Annual Modulation	CDEX-1B	250	1107.5	PRL 123, 221301, 2019
Solar Axion, ALPs, Vector bosonic DM	CDEX-1B	160	737.1	PRD 101, 052003, 2020
Solar dark photon, dark photon DM	CDEX-10	160	205.4/449.6	PRL 124, 111301, 2020
EFT-WIMP	CDEX-1/CDEX-10	160	737.1/205.4	Sci. China 64, 281011, 2021
CR-DM	CDEX-10	160	205.4	arXiv: 2201.01704
DM-electron recoil	CDEX-10	160	205.4	arXiv: 2206.04128



CDEX全技术链



CDEX四大核心技术

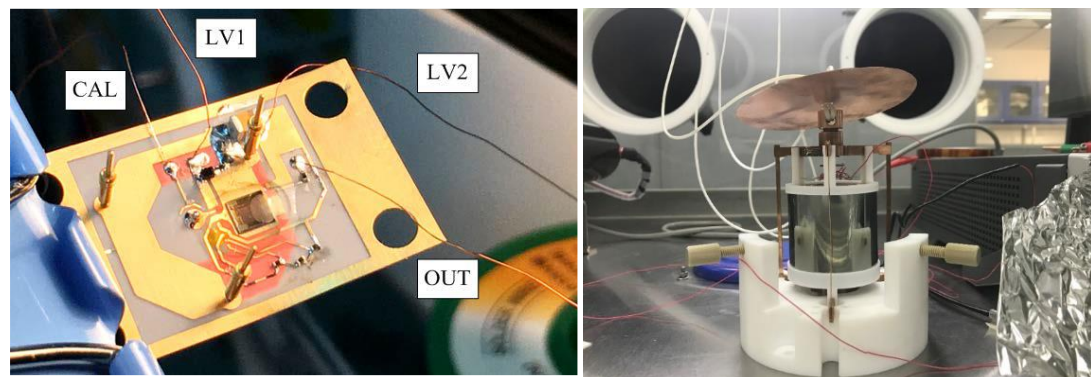
□富集锗原材料

- ✓富集二氧化锗
- ✓富集锗金属
- ✓高纯锗晶体生长



□高纯锗探测器

- ✓定制探测器改进本底、阈值
- ✓自研探测器：真空封装、裸露晶体



□电子学

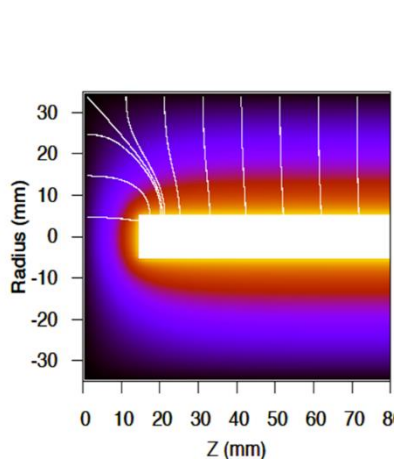
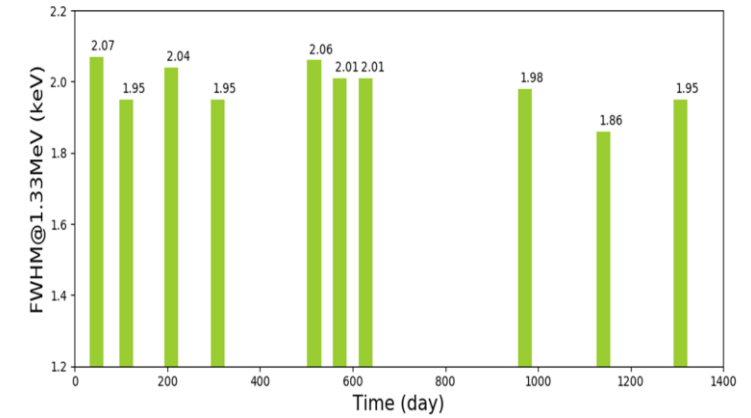
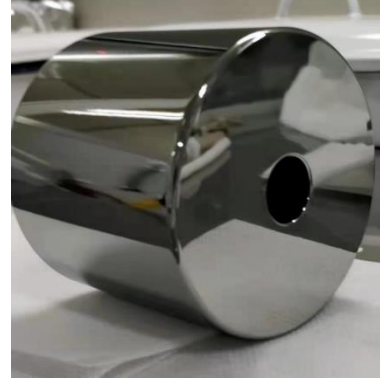
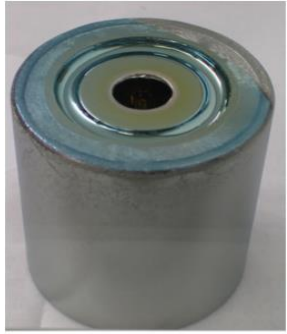
- ✓低本底、低噪声ASIC读出
- ✓高精度波形采样

□低本底

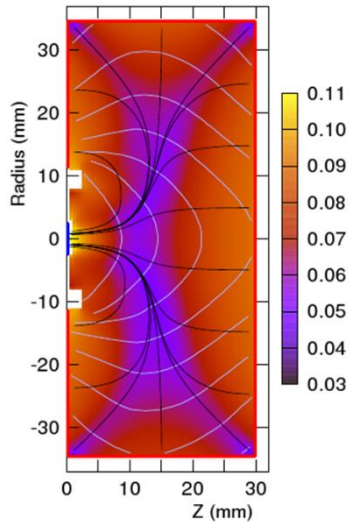
- ✓低本底材料筛选测量：GeTHU
- ✓地下电解铜 $\sim 10 \mu\text{Bq/kg U}$, $\sim 1 \mu\text{Bq/kg Th}$



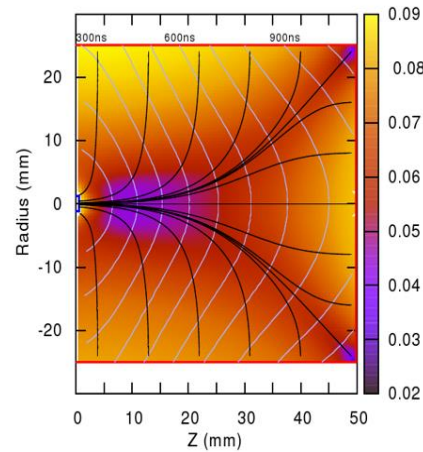
CDEX高纯锗探测器技术研发



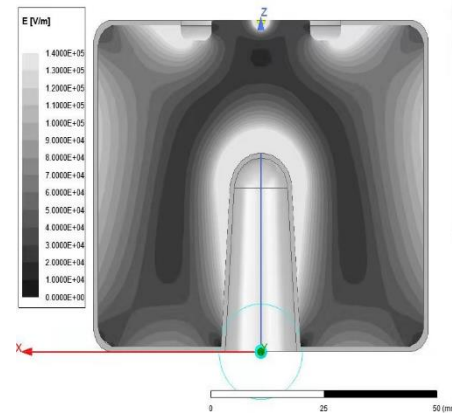
Co-axial



BEGe



PCGe

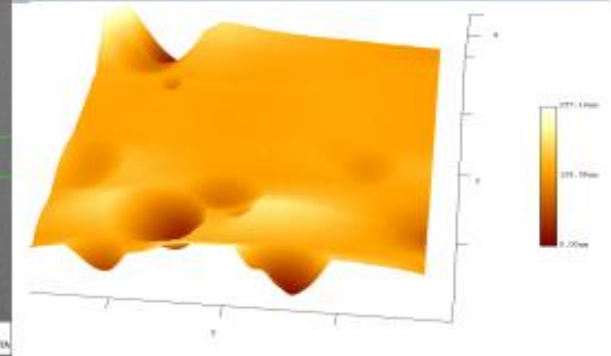
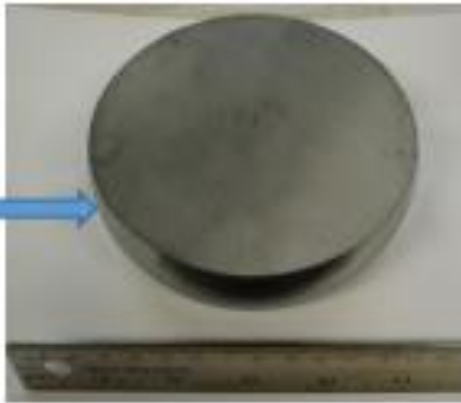
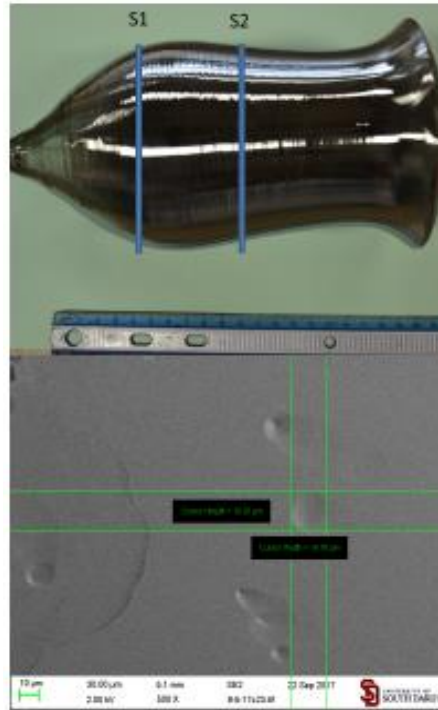
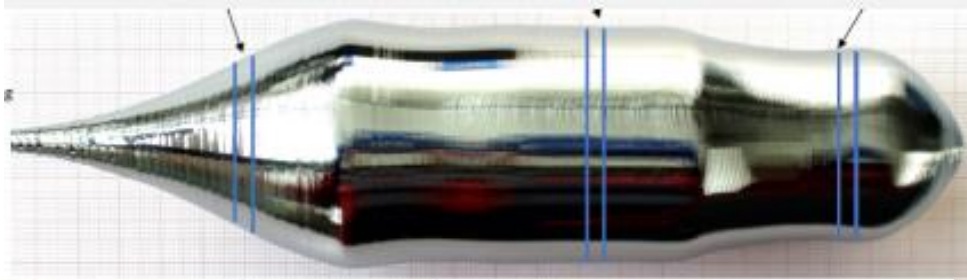


ICPC

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



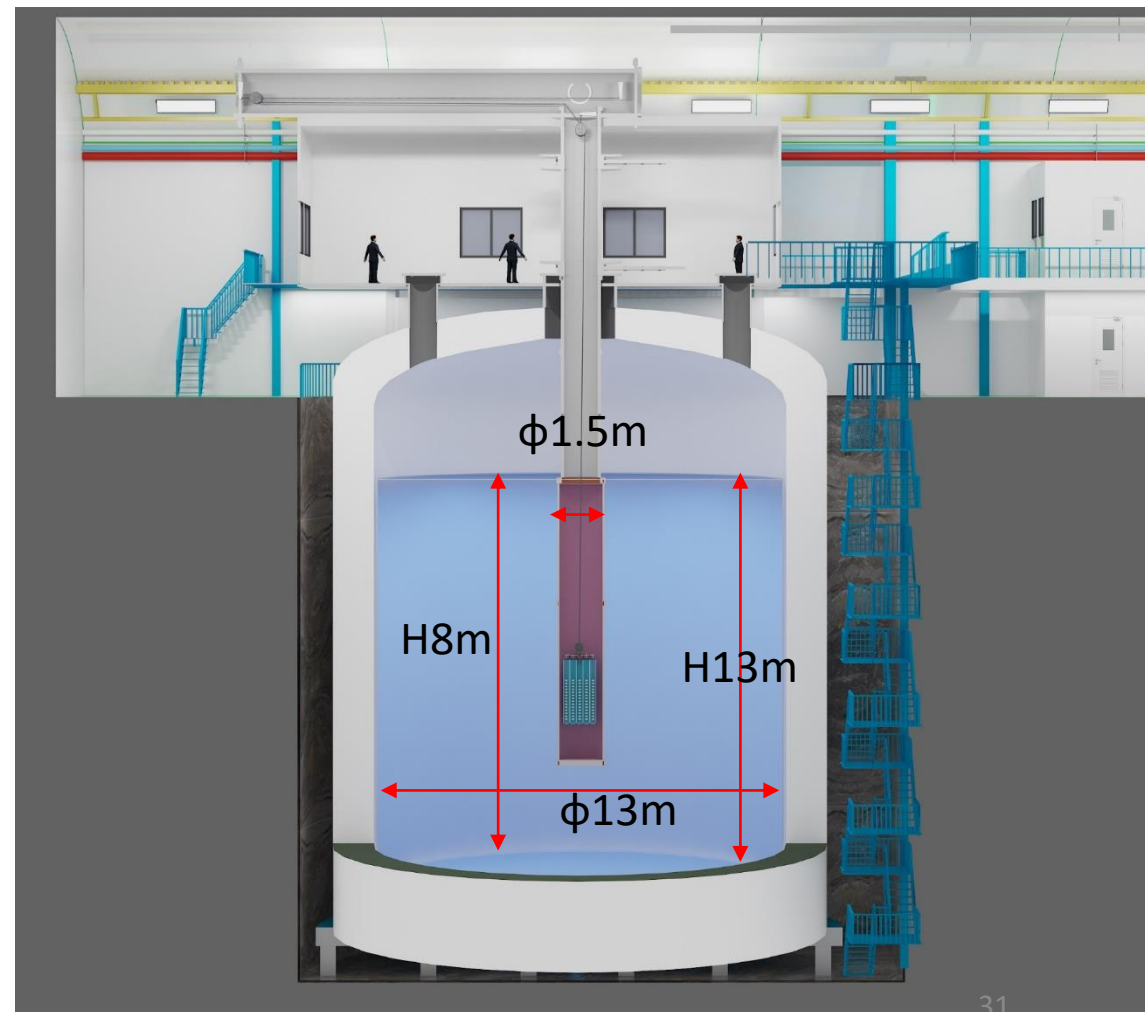
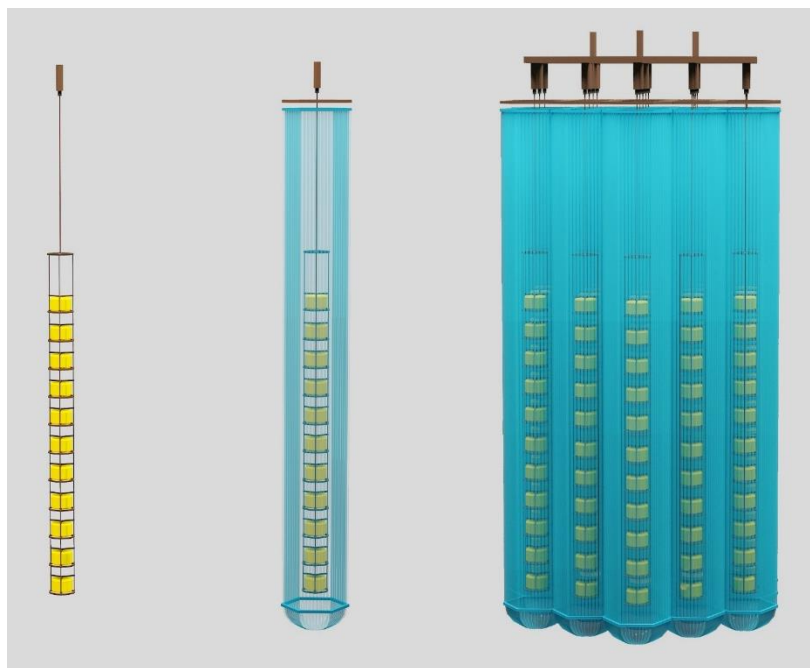
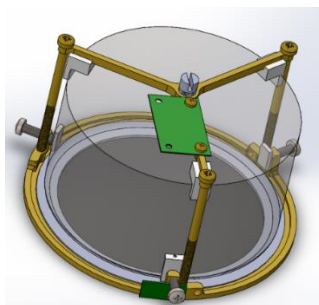
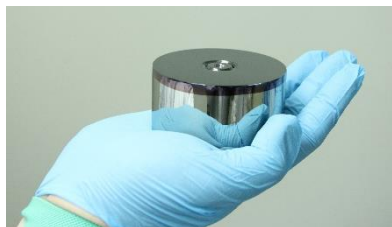
CDEX高纯锗晶体生长





CDEX-300 富集锗阵列系统

- ❑ 富集锗探测单元：1-2kg，能量分辨率最好，本底最低；
- ❑ 300个单元组成一个阵列系统；
- ❑ 多个系统组成吨级或十吨级阵列系统；
- ❑ 采用液氦反符合进一步压低本底。



富集锆 $0\nu\beta\beta$ 实验国际竞争与合作



- 2020年，基于国际形势，中国CDEX-300和欧美联合LEGEND-200两个实验组分开推进实验，从不同国家申请研究经费，并保持沟通和交流；
- 大型实验国际合作是必然。中国CDEX合作组逐步建立如下关键优势：
 - ✓ 在世界最深的CJPL，宇宙线本底低至可忽略；
 - ✓ 中国具有每年数百公斤富集锆的生产能力，原材料供应稳定；
 - ✓ 在国家发改委支持下开展深地高纯锆晶体生长和探测器制备，显著降低高纯锆宇生本底，可将本底水平控制到 10^{29} 年（10吨级富集锆系统）的实验要求范围内。

CDEX-1T 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





总 结

- 中国锦屏地下实验室正在建设国家重大科技基础设施，是国际岩石覆盖最深、可用空间最大、综合条件最优的深地实验平台；CJPL正在支持暗物质直接探测、中微子研究、核天体物理研究等粒子物理与核物理重大前沿研究，并取得了国际前沿研究成果；
- CDEX合作组利用高纯锗开展暗物质直接探测和 $0\nu\beta\beta$ 实验。CDEX-1和CDEX-10取得了一系列暗物质和中微子研究成果；正在推进世界最大规模的CDEX-300富集锗中微子和暗物质实验系统的建设，并在一系列核心技术方面取得自主突破；
- 面向未来吨级和十吨级富集锗实验，CDEX积极推进国际合作，努力吸引国际合作的大科学项目落户CJPL，打造我国锦屏深地前沿研究高地。