



CDEX实验进展和计划

马豪

清华大学工程物理系

2021.5.15



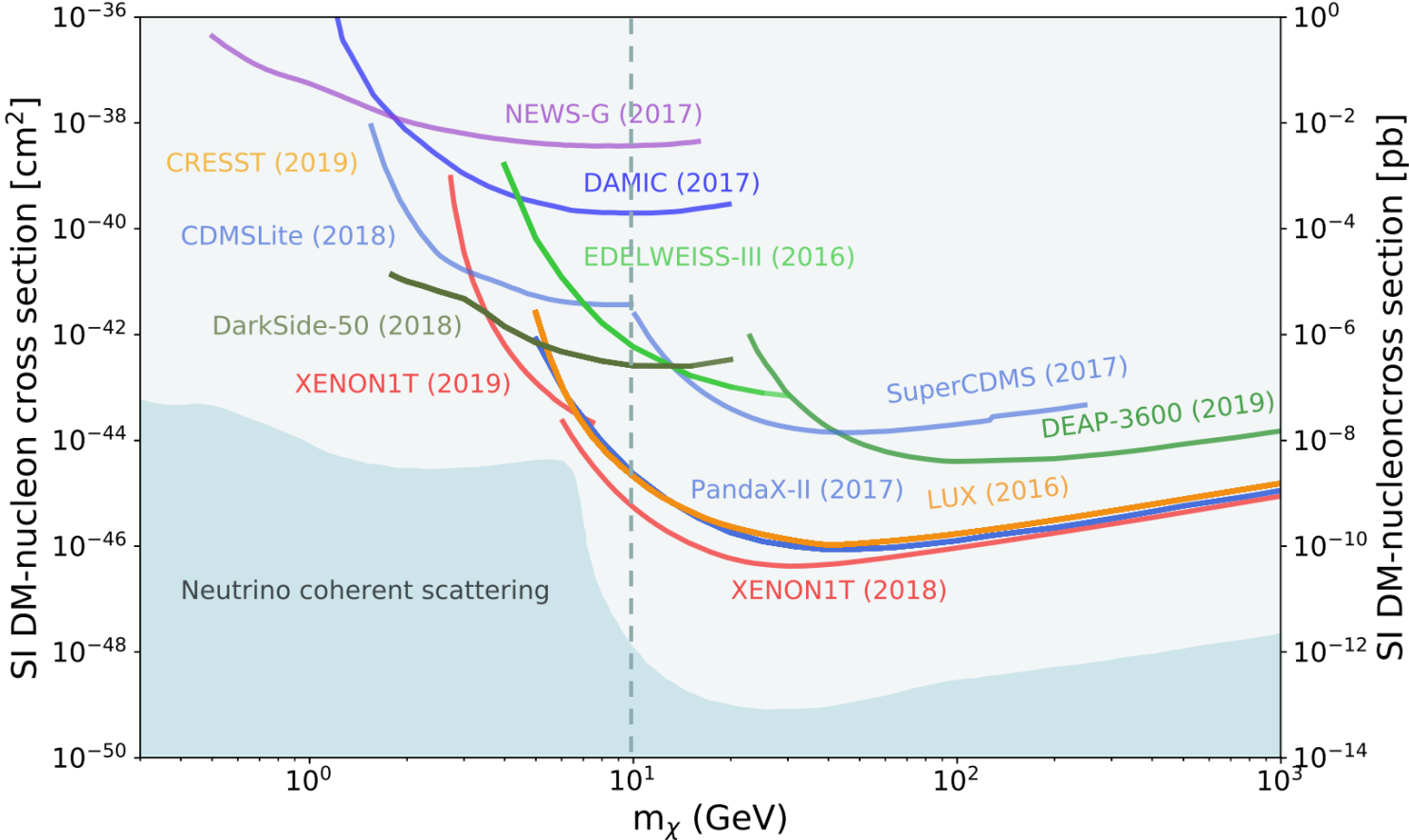
报告提纲

- 国内外实验进展和趋势
- CDEX实验进展
- CDEX-50计划
- 总结



国内外实验进展和趋势

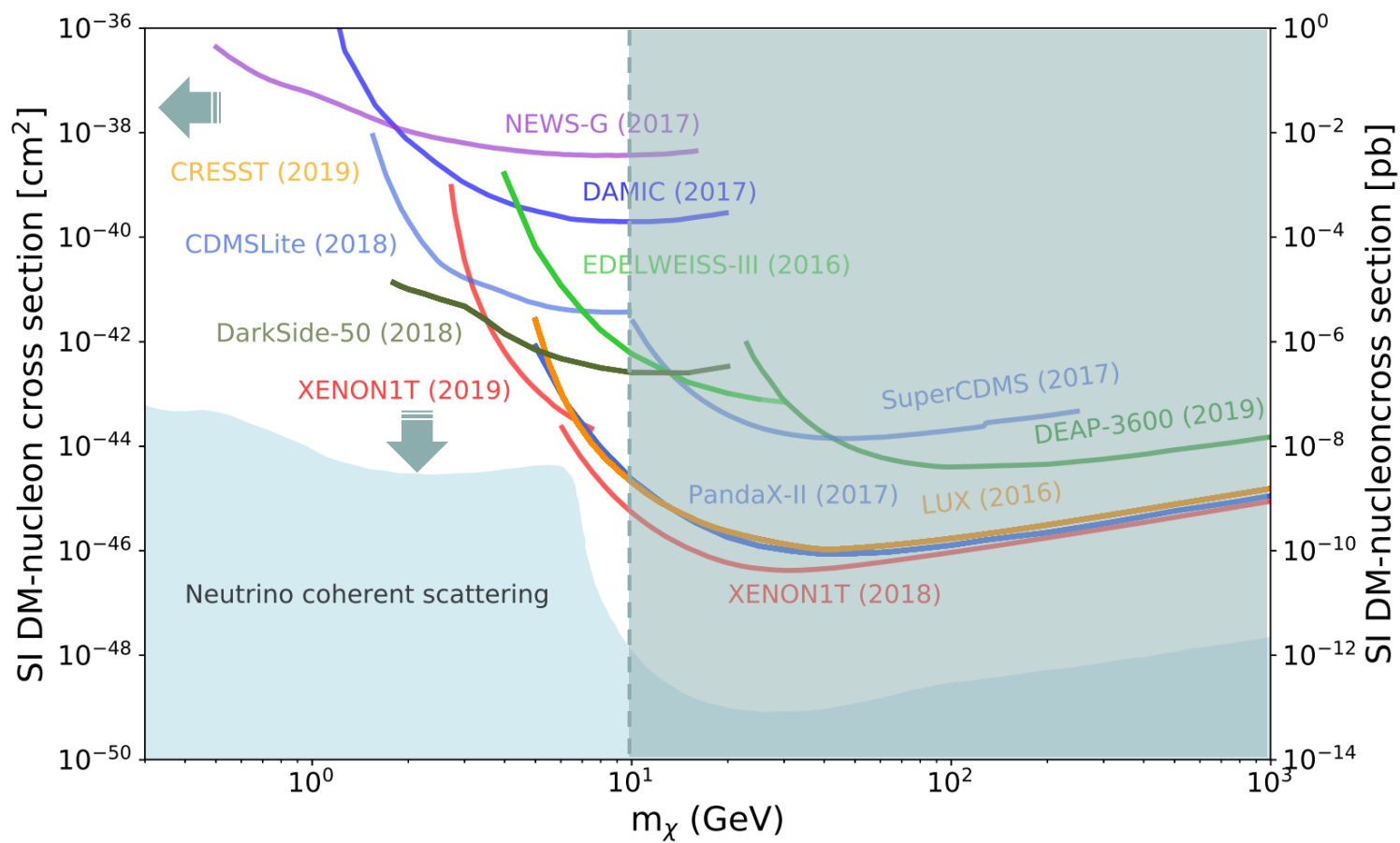
- 暗物质直接探测实验





国内外实验进展和趋势

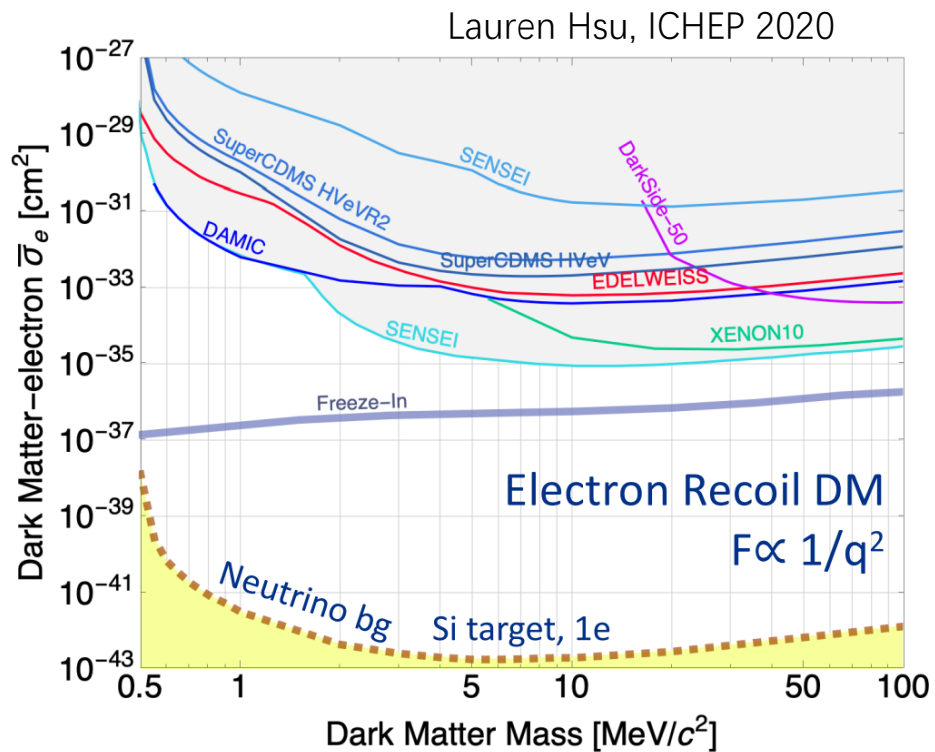
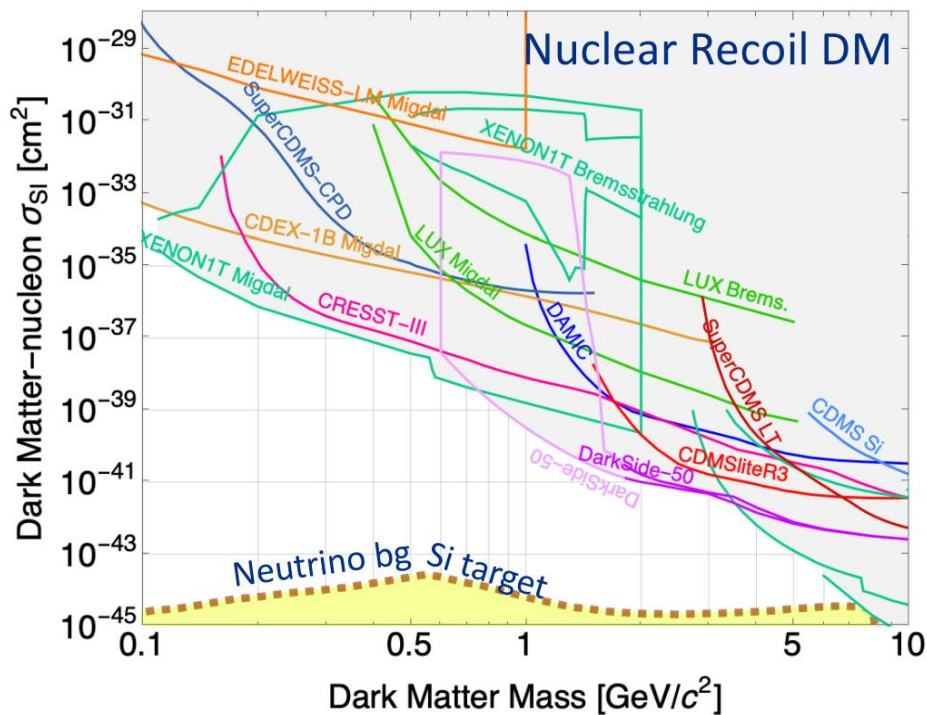
- 轻质量区：更低本底、更低阈值、更大曝光量





国内外实验进展和趋势

- 轻质量区：竞争激烈
 - 更低本底 (\rightarrow bkg free)、更低阈值 (\rightarrow 单电子/空穴)
 - 更大曝光量 (探测器质量)



Lauren Hsu, ICHEP 2020

CDEX “盘古” 计划 (China Dark Matter Experiment)

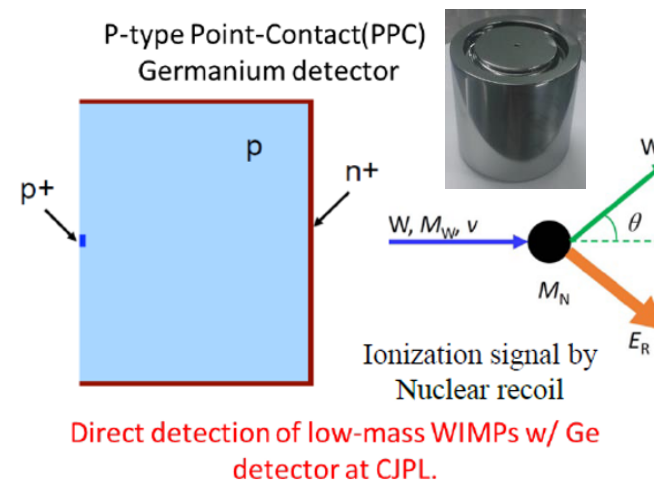


• CDEX历史

- 2005年, 韩国Y2L, 5g HPGe
- 2009年, CDEX合作组成立
- 2011年, CJPL-I, 1kg点电极高纯锗
- 2016年, 10 kg 阵列点电极高纯锗

• CDEX现状

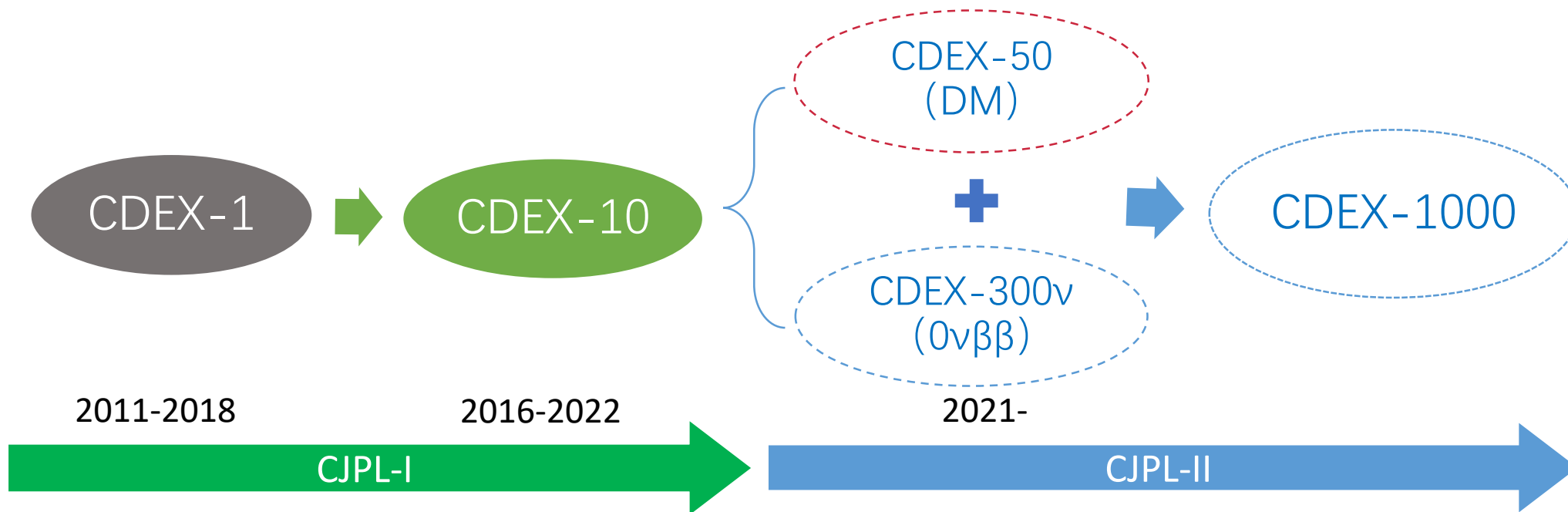
- 11个单位, 70余人
- 10+ kg PPC Ge (单相: 电离)
- 新建液氮恒温器 @ CJPL-II





CDEX “盘古” 计划

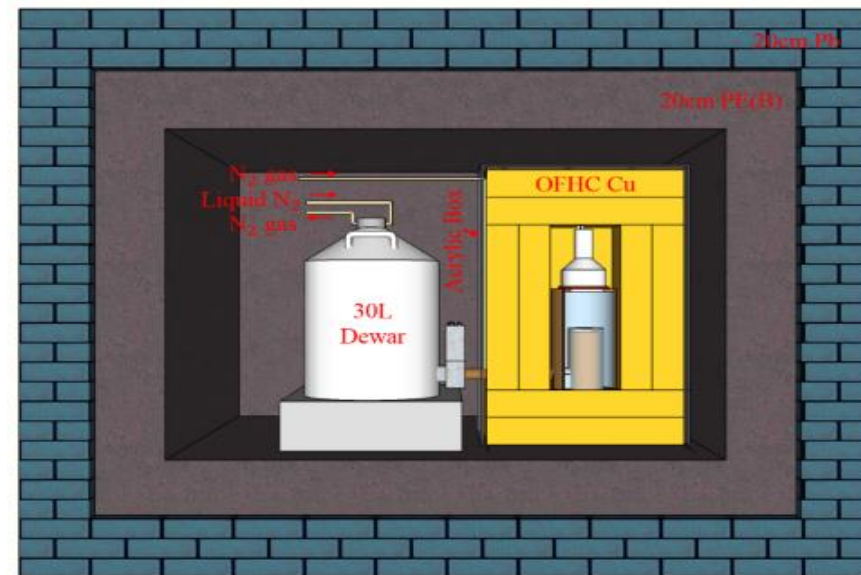
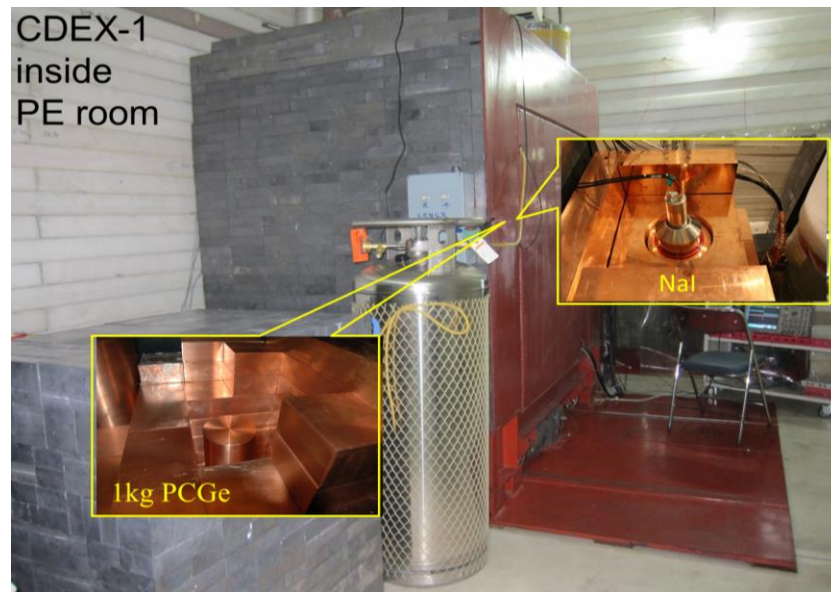
- CDEX-1 (2011-2018) : 发展点电极高纯锗探测器技术, 开展本底研究;
- CDEX-10 (2016-2022) : 液氮直冷高纯锗阵列性能研究;
- CDEX-50 (2021-) : 50公斤级液氮直冷高纯锗阵列实验系统;



CDEX-1 实验阶段



- 两套单体1kg的点电极高纯锗探测器
 - CDEX-1A(原型, 2011)→1B(升级, 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米厚的聚乙烯屏蔽室中@CJPL-I;



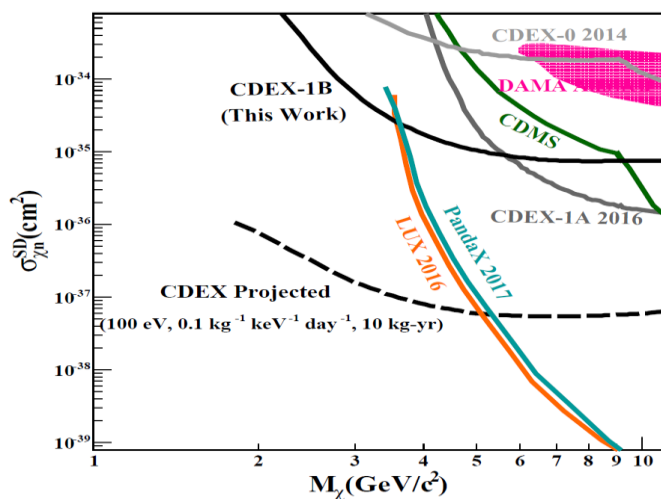
CDEX-1A&B: 1kg PPC Ge × 2



CDEX-1B物理结果

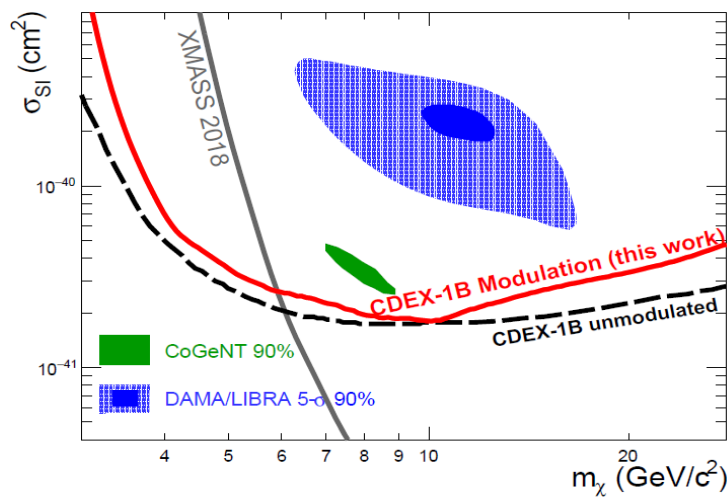
- WIMP: 探测阈值达到2GeV, 给出了4GeV以下自旋相关国际最灵敏实验结果。
- 年度调制效应: 排除了DAMA和CoGeNT实验暗物质信号可能区域, 对<6GeV WIMP年度调制国际最强限制;
- 基于Migdal效应的亚GeV轻暗物质探测: 在50-180MeV质量区间自旋无关截面国际最强限制;

Chin. Phys. C 42, 023002 (2018)



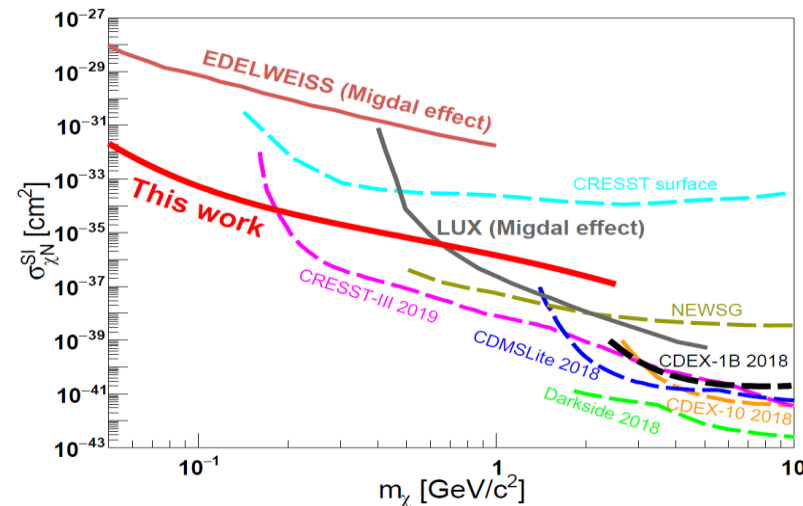
CDEX-1B自旋无关暗物质排除线

Phys. Rev. Lett. 123, 221301 (2019)



CDEX-1B年度调制效应分析

Phys. Rev. Lett. 123, 161301 (2019)



基于Migdal效应的轻暗物质搜索

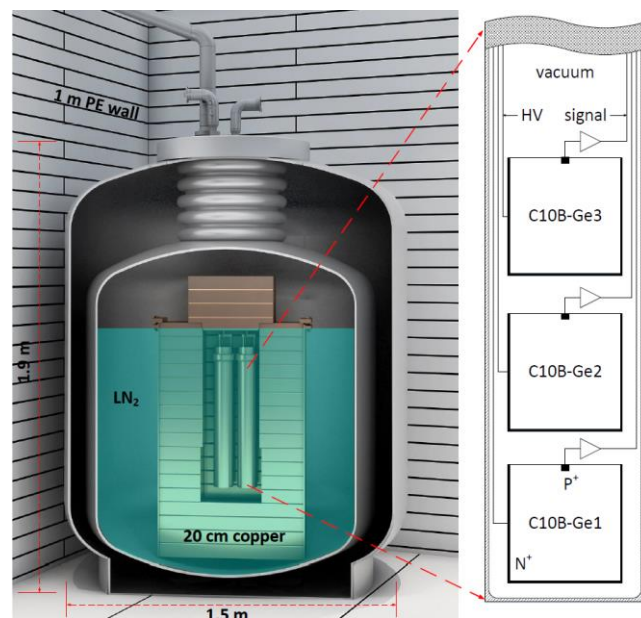


CDEX-10阶段

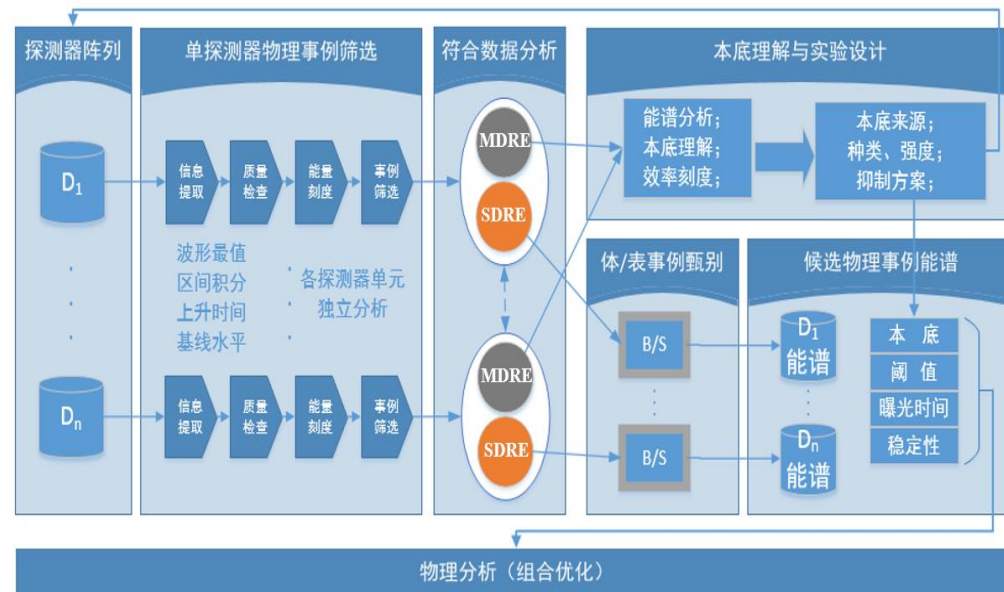
- 建立了国际上首个液氮直冷高纯锗阵列系统，探测器质量~10kg；
- 发展了阵列化探测器系统的数据合成方法，以及多探测器联合的物理分析框架；
- 建立了<2keV低能区能量刻度方法：中子活化法、 γ 源激发法、多通道比较法等；



CDEX-10暗物质实验系统



Science China-PMA 62, 031012 (2019)

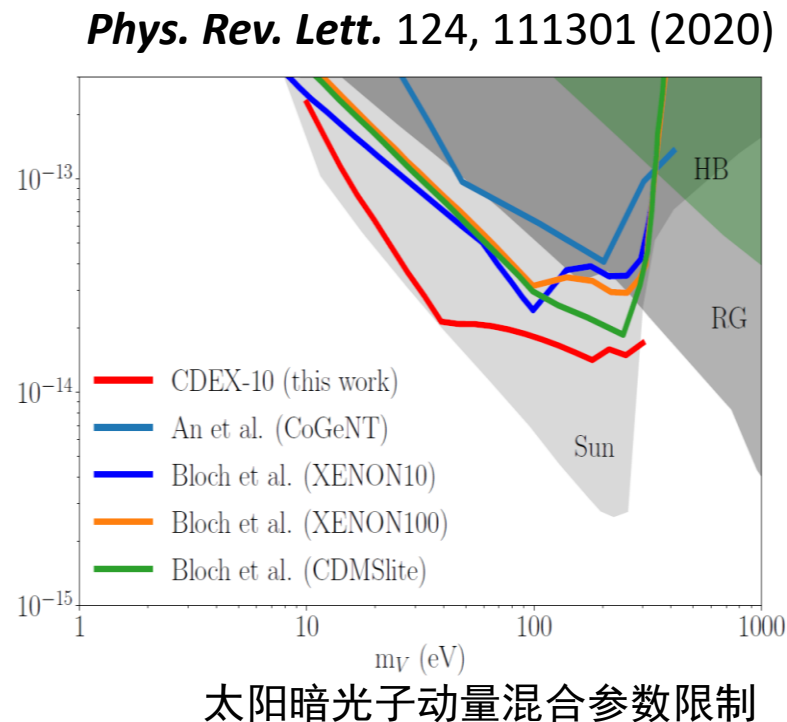
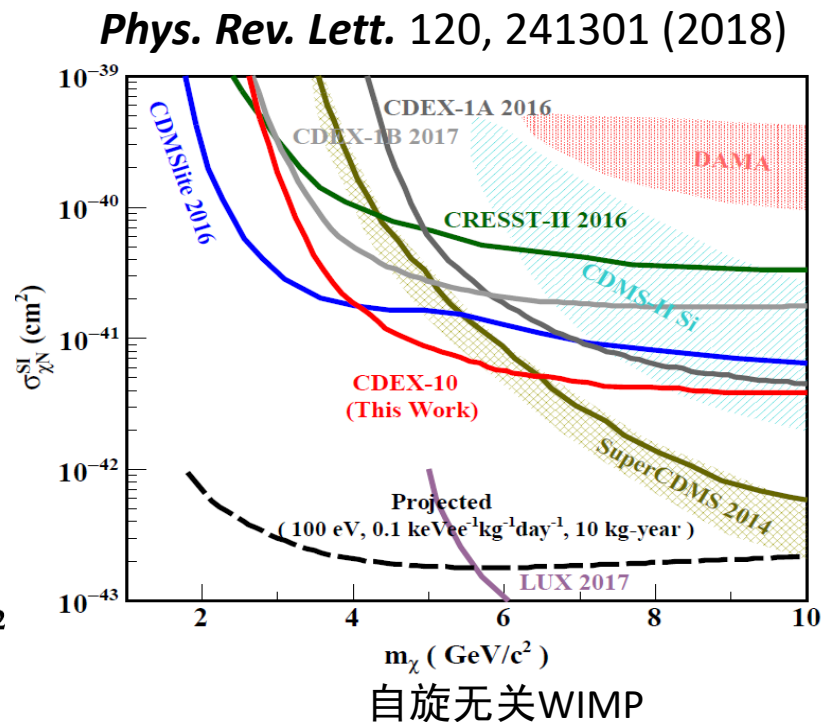
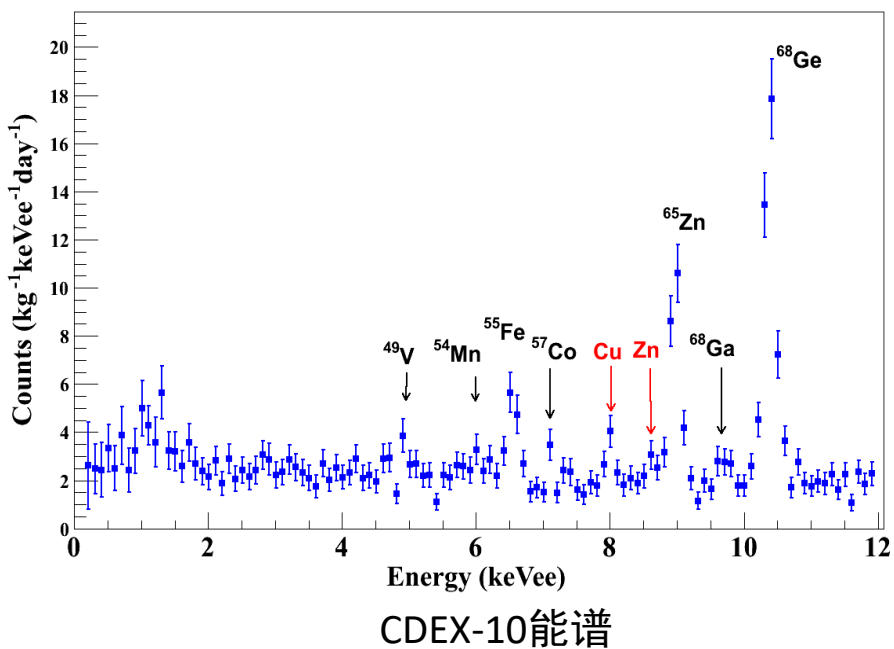


阵列化探测器系统数据合成方法框图



CDEX-10物理结果

- WIMP: 4-5 GeV自旋无关国际最灵敏实验结果;
- 暗光子: 10-300 eV太阳暗光子动量混合参数限制国际最好的直接探测实验结果;



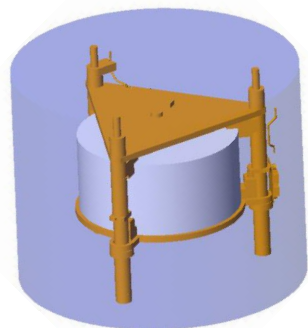


CDEX-50计划

- 液氮直冷的高纯锗探测器阵列;
- 由7串组成, 每串7个探测器;
- 有效靶质量~50kg;
- BEGe+PPCGe;

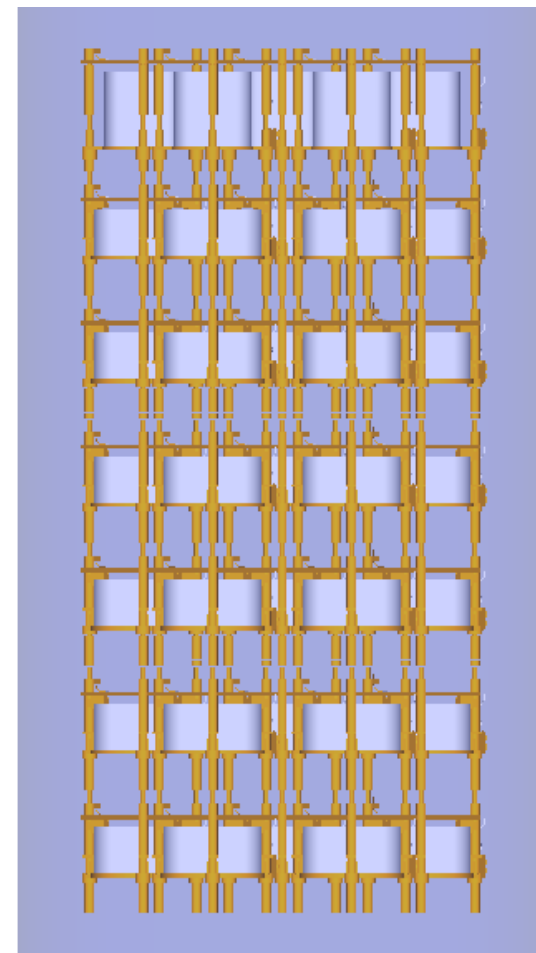
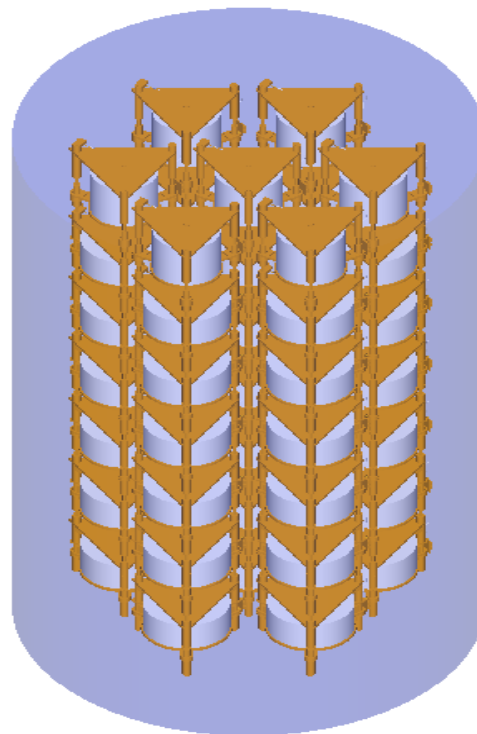
BEGe

- Mass: 1-1.2 kg;
- Size: $\phi 80\text{mm} \times 40\text{mm}$;
- Dead layer: 0.6mm;



PPCGe

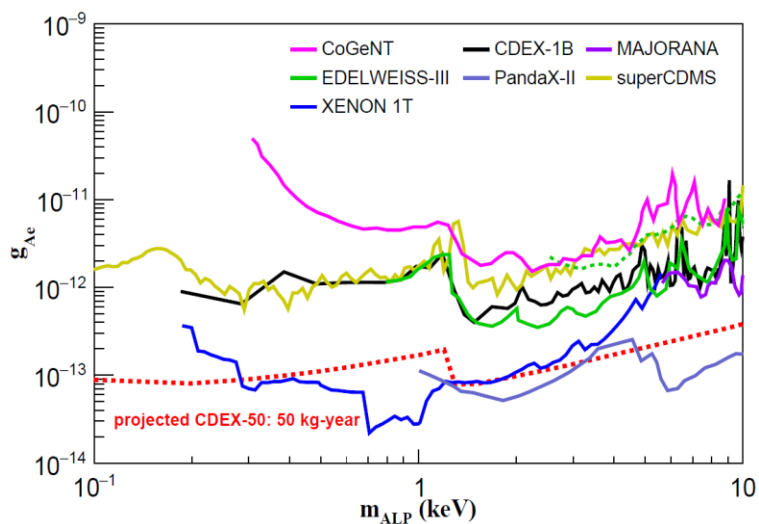
- Mass: ~1 kg;
- Size: $\phi 62\text{mm} \times 62\text{mm}$;
- Dead layer: 0.8 mm;



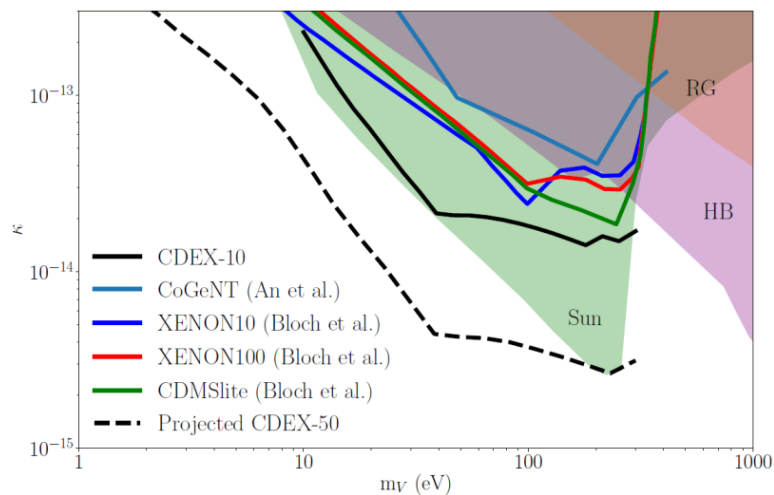


CDEX-50计划

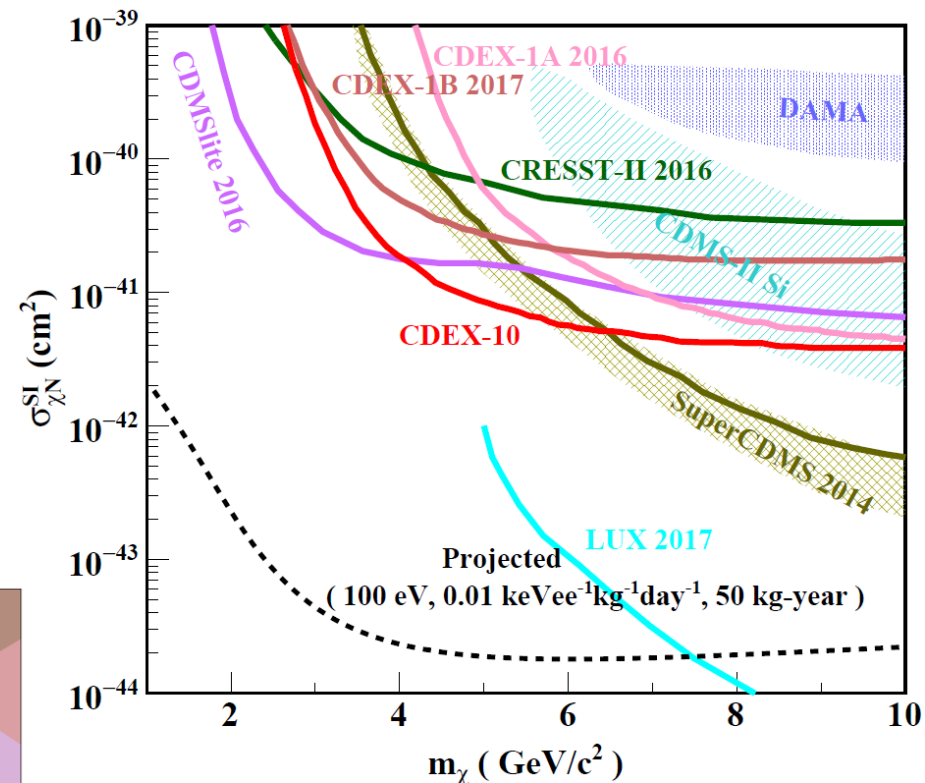
- 本底水平 < 0.01 cts/(keV·kg·day) @ 1 keV;
- 实验数据分析阈值 100 eV;
- 有效曝光量 ~ 50 kg year;
- WIMP自旋无关灵敏度达到 10^{-44} cm²水平;
- 同时, 开展轴子、暗光子等实验研究;



Pseudoscalar ALPs



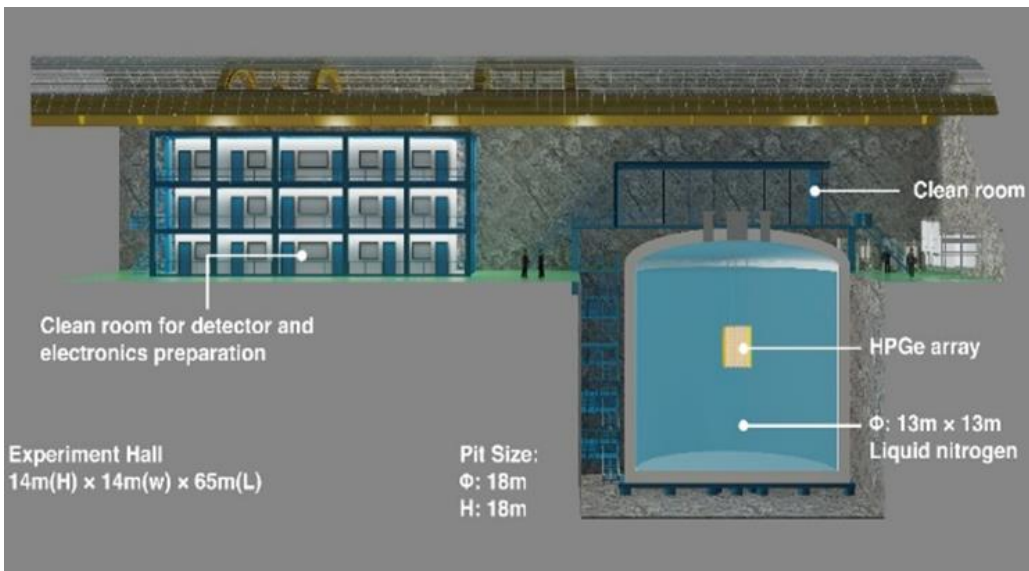
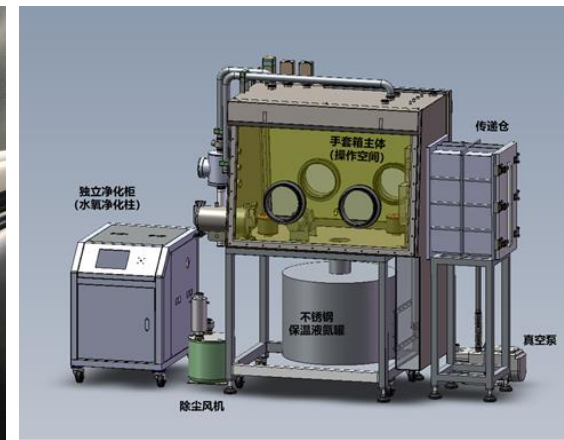
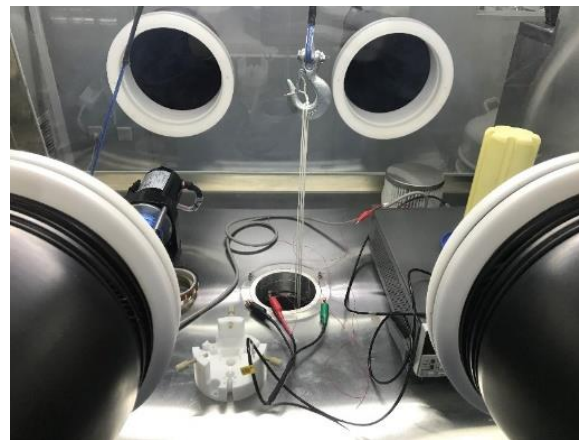
Solar DarkPhoton



CDEX-50计划



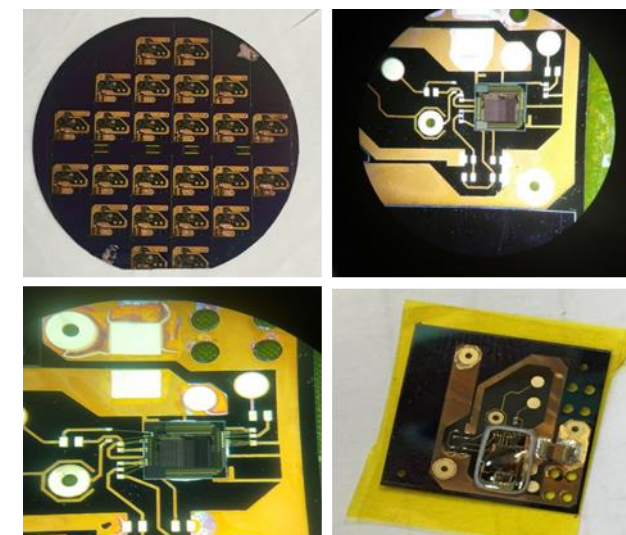
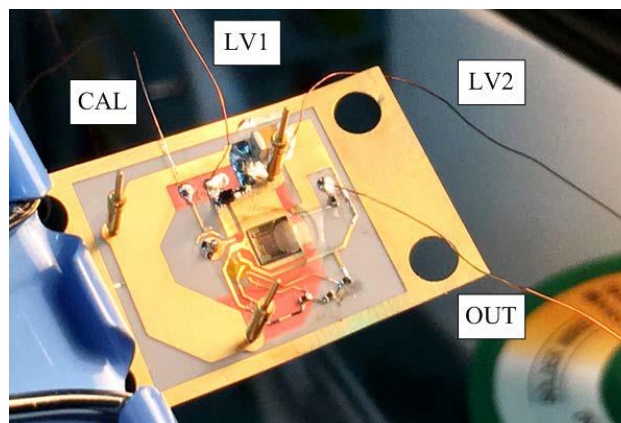
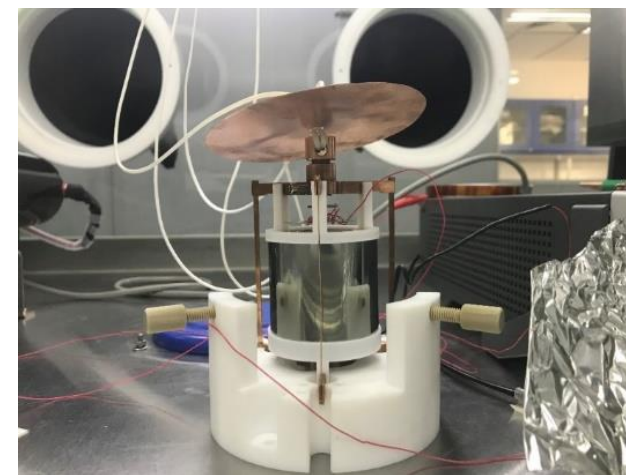
- 探测器单元与小阵列测试 @CJPL-I
- 锦屏大设施建设 @CJPL-II
- 1725m³液氮屏蔽装置 @CJPL-II;
- 2023年，探测器阵列试运行；



CDEX-50计划：探测器

详见李玉兰报告 

- HPGe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
 - 高纯锗晶体生长
- 电子学
 - 低本底、低噪声ASIC读出
 - 高精度波形采样

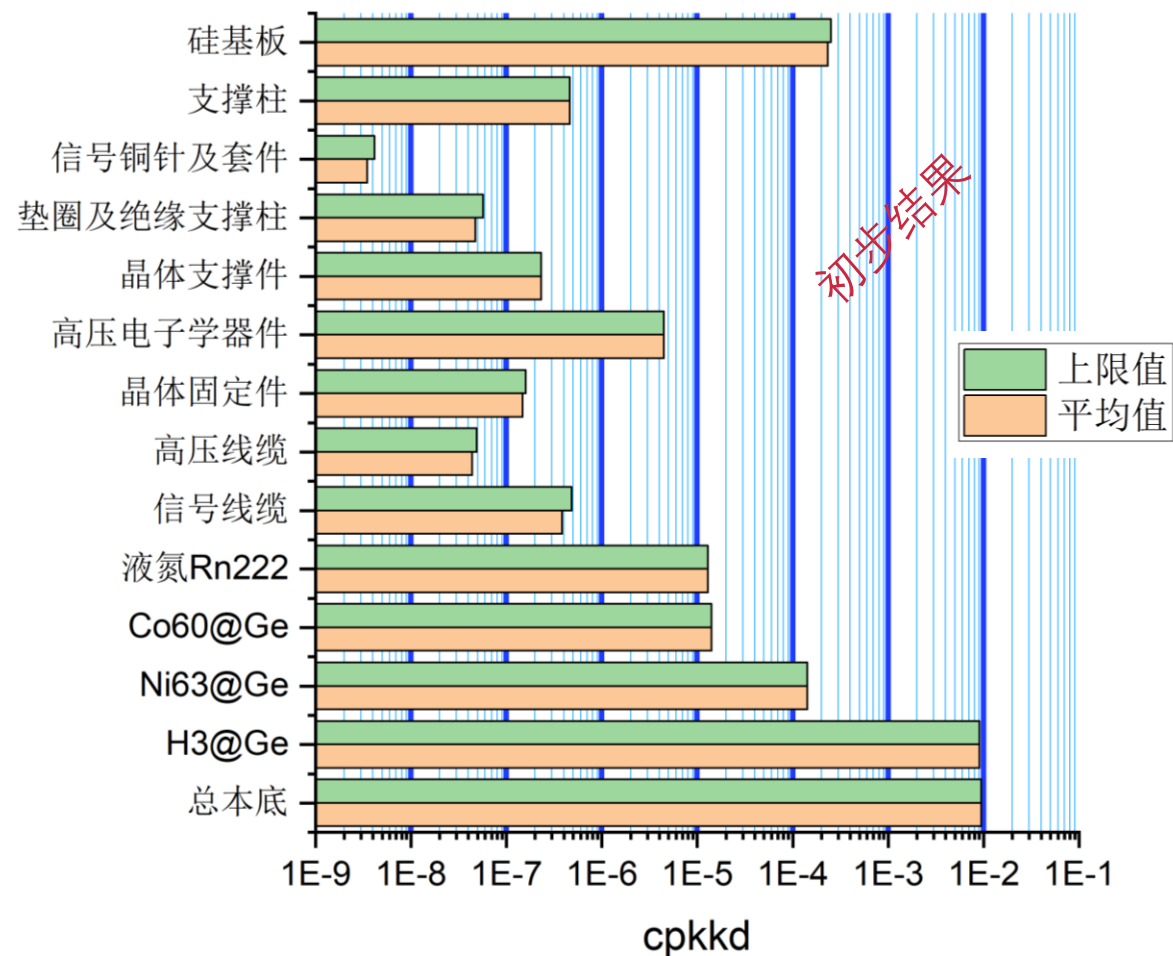


CDEX-50:低本底控制



• 本底模型

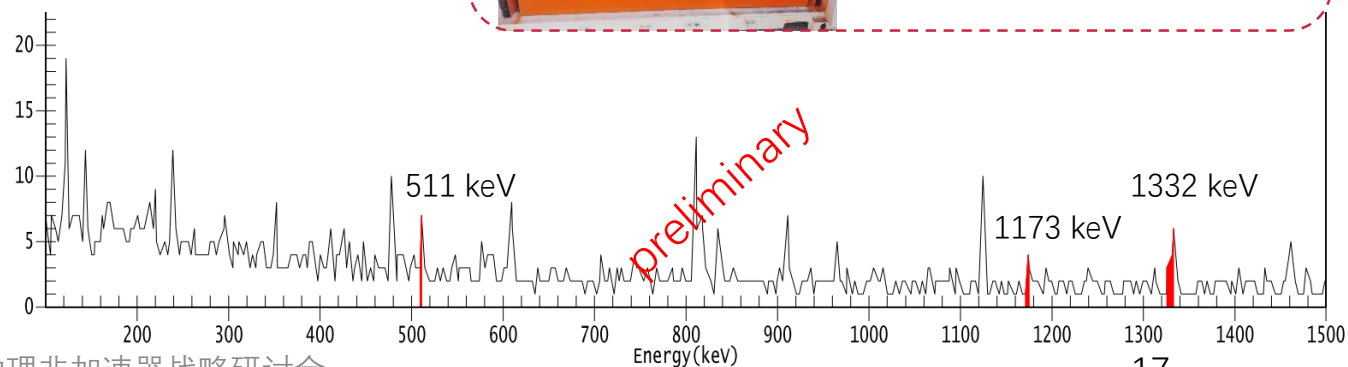
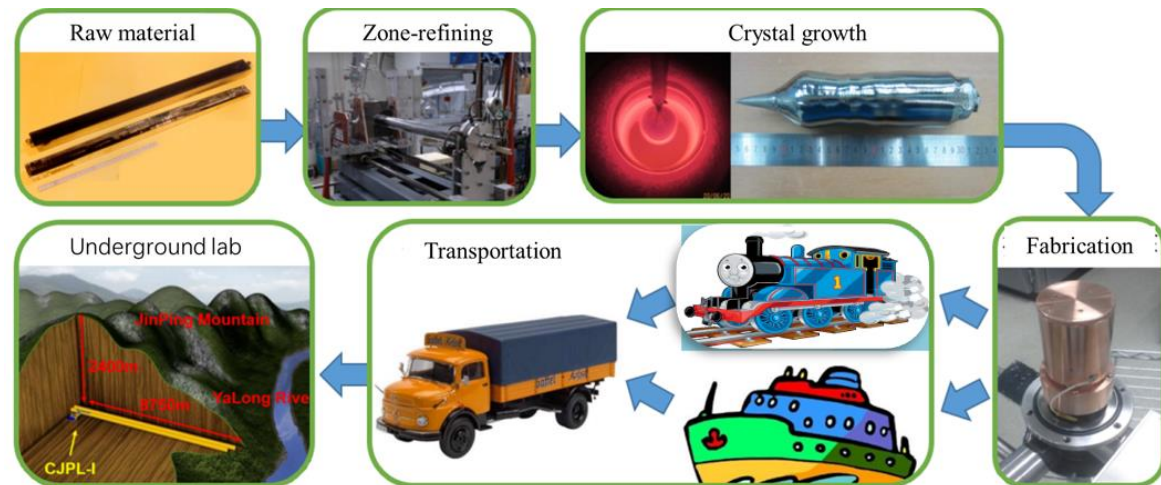
- 前放硅基板
- 高压器件
- 液氮 (Rn-222)
- Ge宇生
 - H-3
 - Ni-63



CDEX-50计划：低本底控制



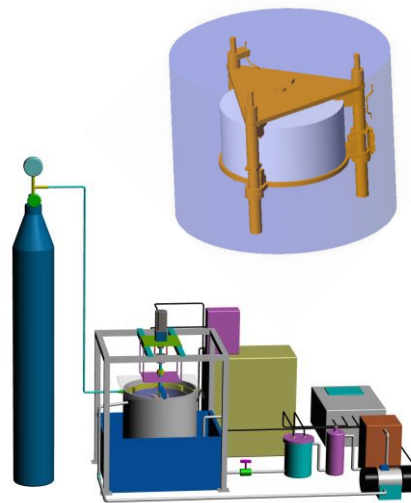
- 锗晶体宇生本底控制
 - 生产：地面制作+地下储存
 - 运输：火车+屏蔽装置
- 宇生本底模拟：0.02cpkkd
 - 探测器制作：45d
 - 地面运输：60d
 - 地下冷却：180d
- 运输路线（无屏蔽）
 - 法国-荷兰，卡车运输：2d
 - 荷兰-成都，中欧班列：20d
 - 成都-锦屏，卡车运输：3d.





CDEX-50计划：低本底控制

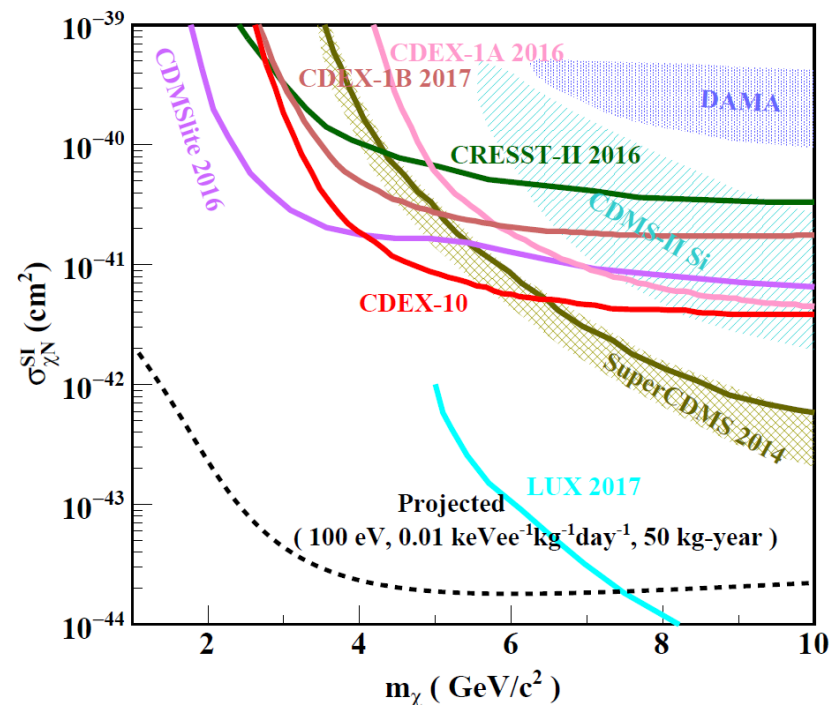
- 电解铜原型装置
 - 阴极: 316L不锈钢, $\phi 95 \times 380 \text{mm}$;
 - 电解槽: PE, $\phi 400 \times 500 \text{mm}$;
 - 完成地面运行;
- 样品本底测量
 - 3N铜原料, ICP-MS @ IHEP;
 - Th-232: $0.40 \pm 0.13 \text{ pg/g}$ ($1.6 \pm 0.5 \text{ uBq/kg}$)
 - U-238: $0.86 \pm 0.17 \text{ pg/g}$ ($10.6 \pm 2.1 \text{ uBq/kg}$)





总结

- CDEX-1、CDEX-10
 - 高纯锗探测器技术、低本底技术
 - WIMP、轴子、暗光子物理
- CDEX-50：更低本底、更大质量
 - 探测器、电子学研发
 - 低本底控制：本底模型、宇生控制、地下高纯材料制备



谢谢！

CDEX-50

