



清华大学  
Tsinghua University



# CDEX 实验

清华大学  
王青  
2019. 1. 21



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

# 报告内容

---



- 暗物质直接探测现状
- CDEX的过去
- CDEX的现在
- CDEX的未来



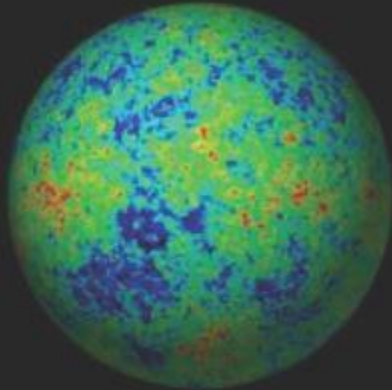
清华大学  
Tsinghua University



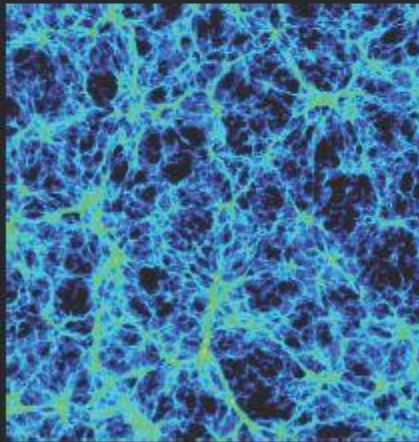
# 暗物质直接探测的现状

# Dark Matter

CMB



Supernova



Structure

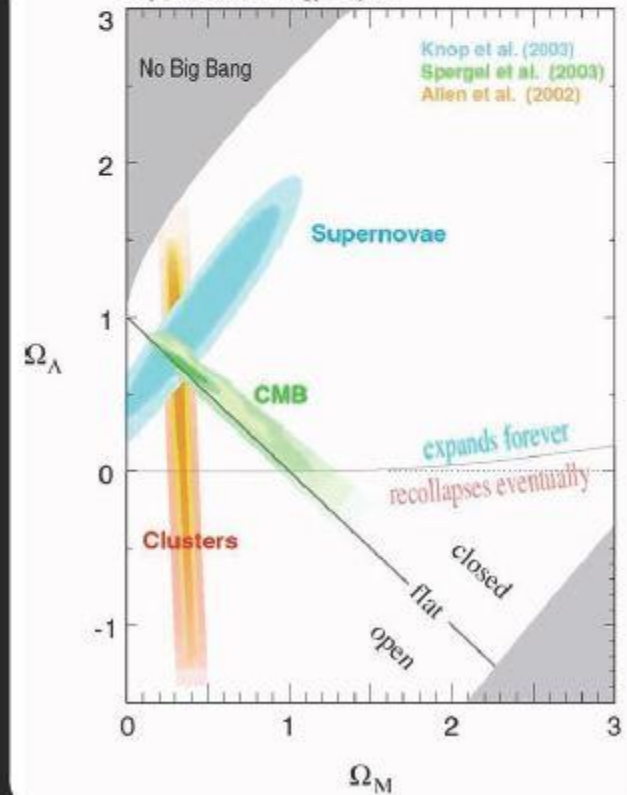


Lensing

- Ordinary Matter
- Dark Matter
- Dark Energy



Supernova Cosmology Project

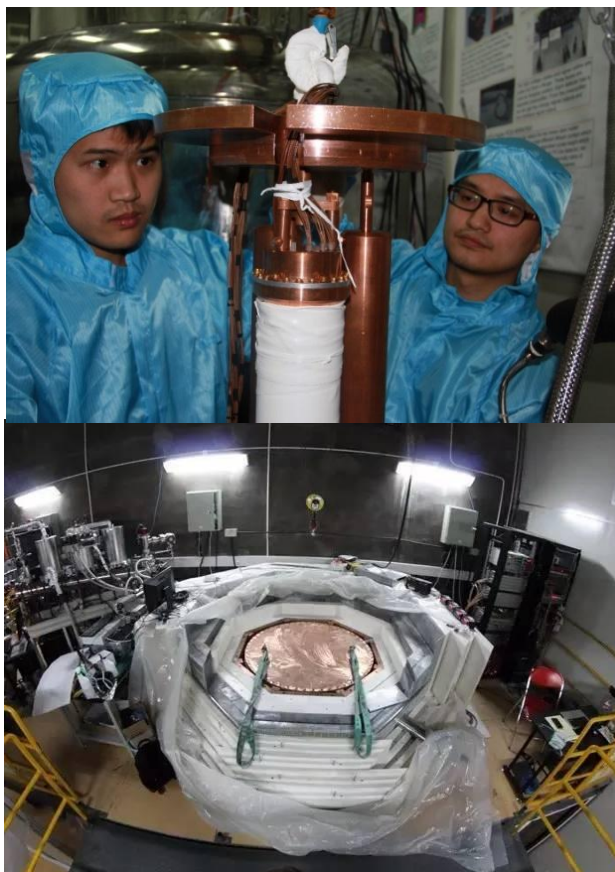




# 暗物质实验的主要研究方法

## ■ 直接探测

暗物质与物质直接散射



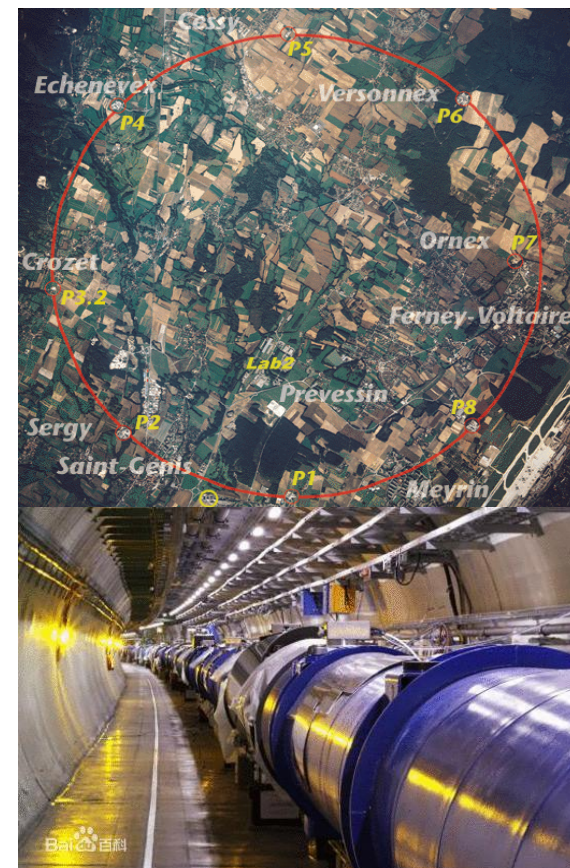
## ■ 间接探测

探测暗物质湮灭后的产物



## ■ 对撞机

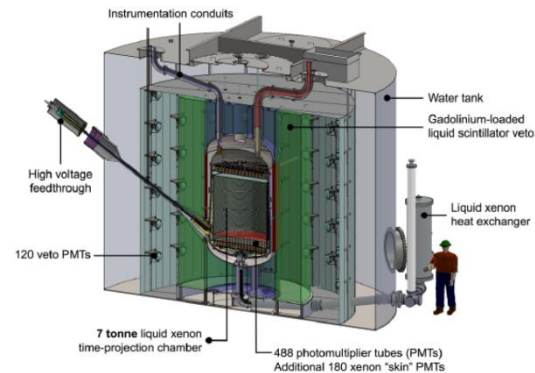
产生暗物质



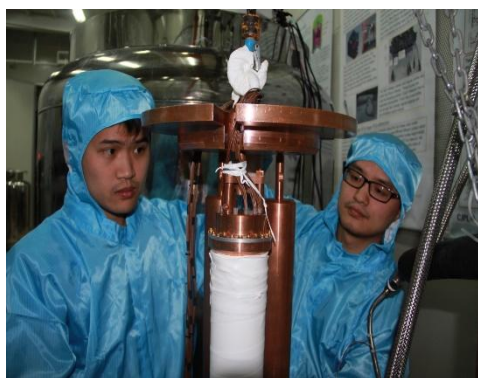


# 暗物质直接探测研究实验

## 国外



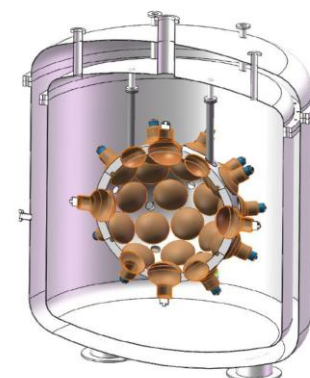
## 国内



**10GeV以下  
轻质量区  
Ge**



**10-300GeV  
中等质量区  
LXe**



**100-1000GeV  
重质量区  
LAr**

# 暗物质直接探测最新结果

DS50 S2 : PRL121, 081307(2018)

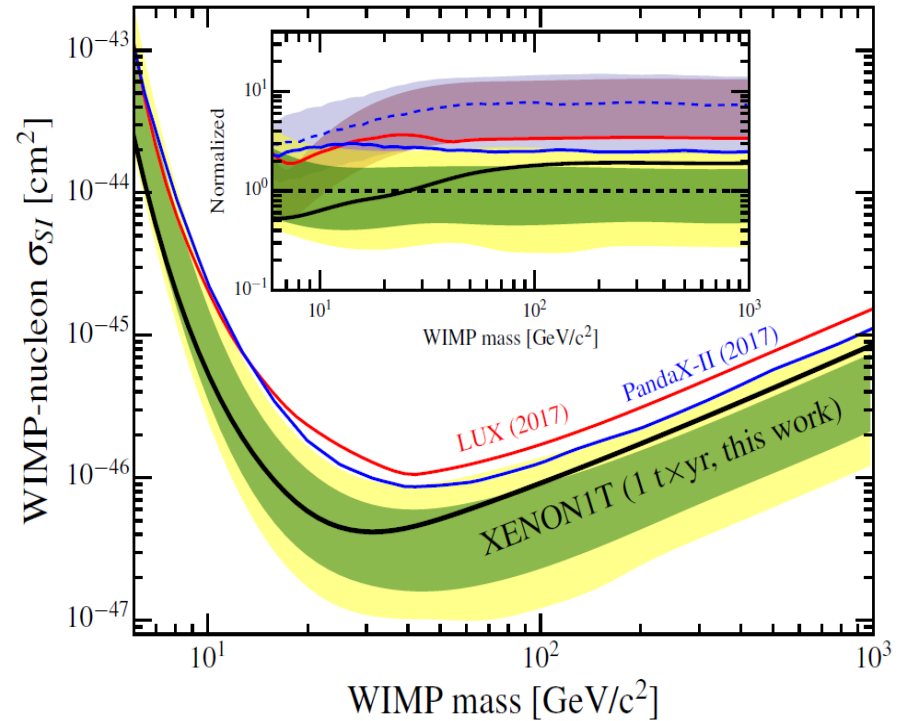
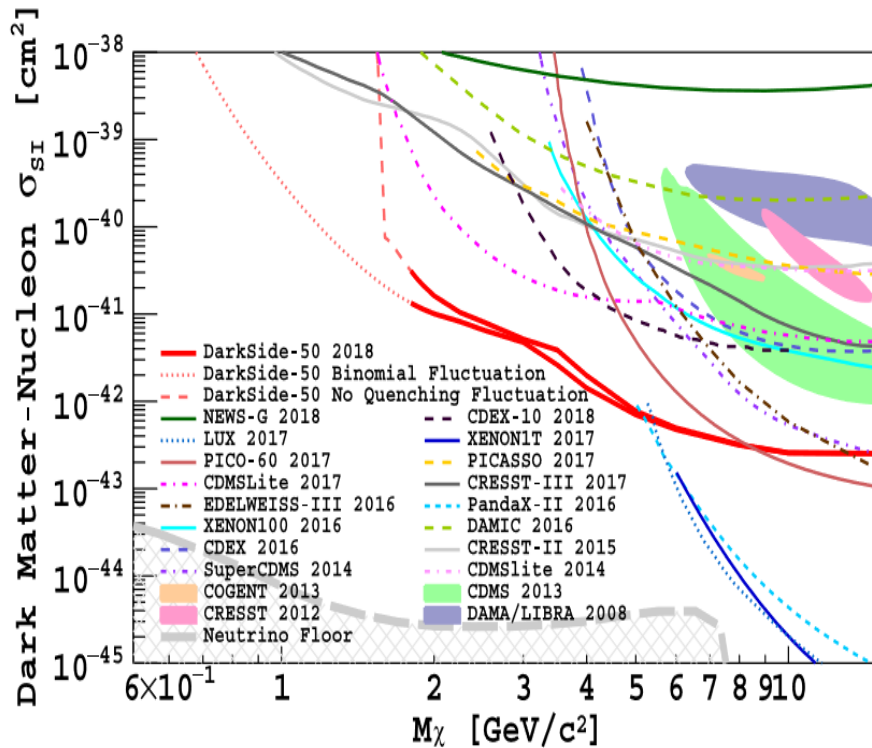
阈值 : 0.1 eVee

本底 : 1.5 cpkkd@0.5keVee

XENON1T : PRL121, 111302(2018)

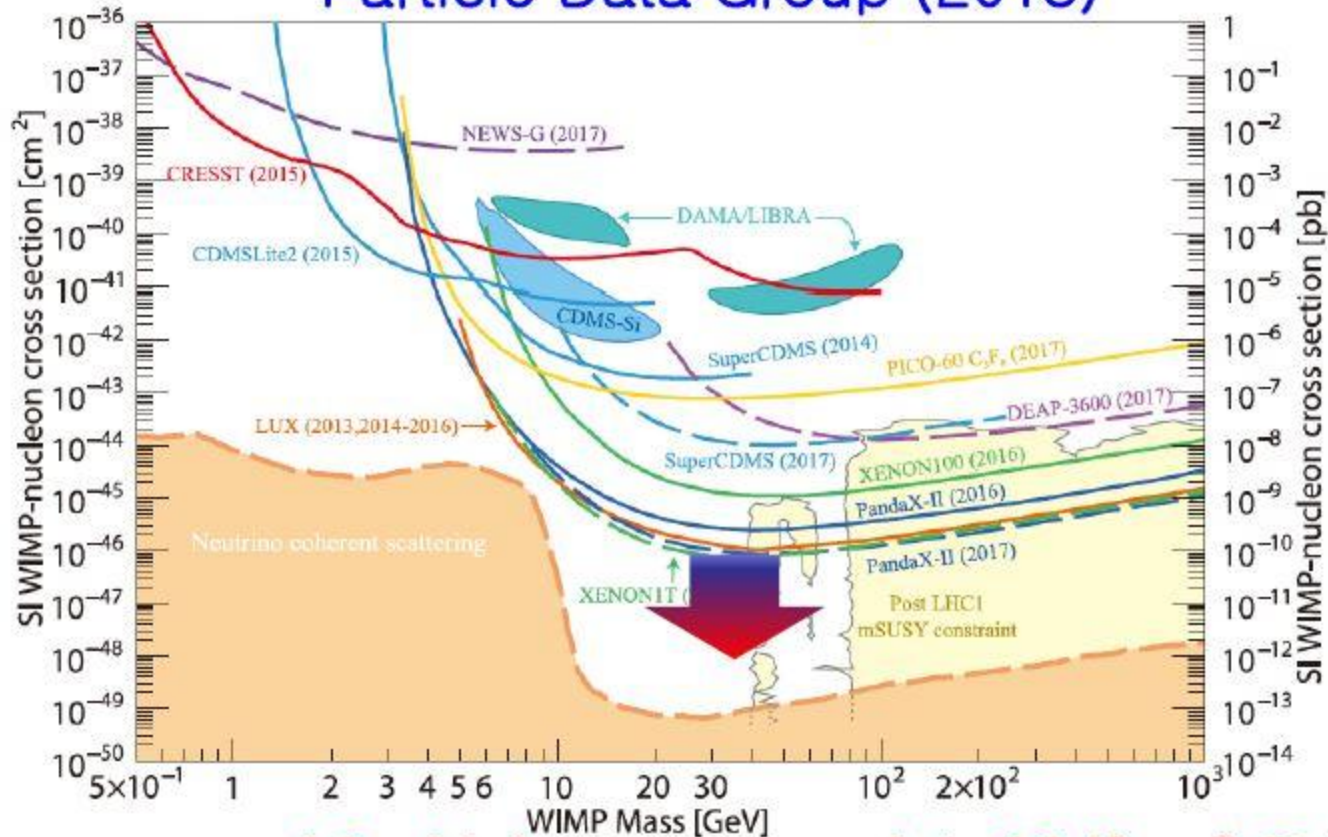
总质量: 3.2 ( 2, 1.3 ) T

灵敏度 : 4.1E-47@30GeV



# High Mass Search

Particle Data Group (2018)

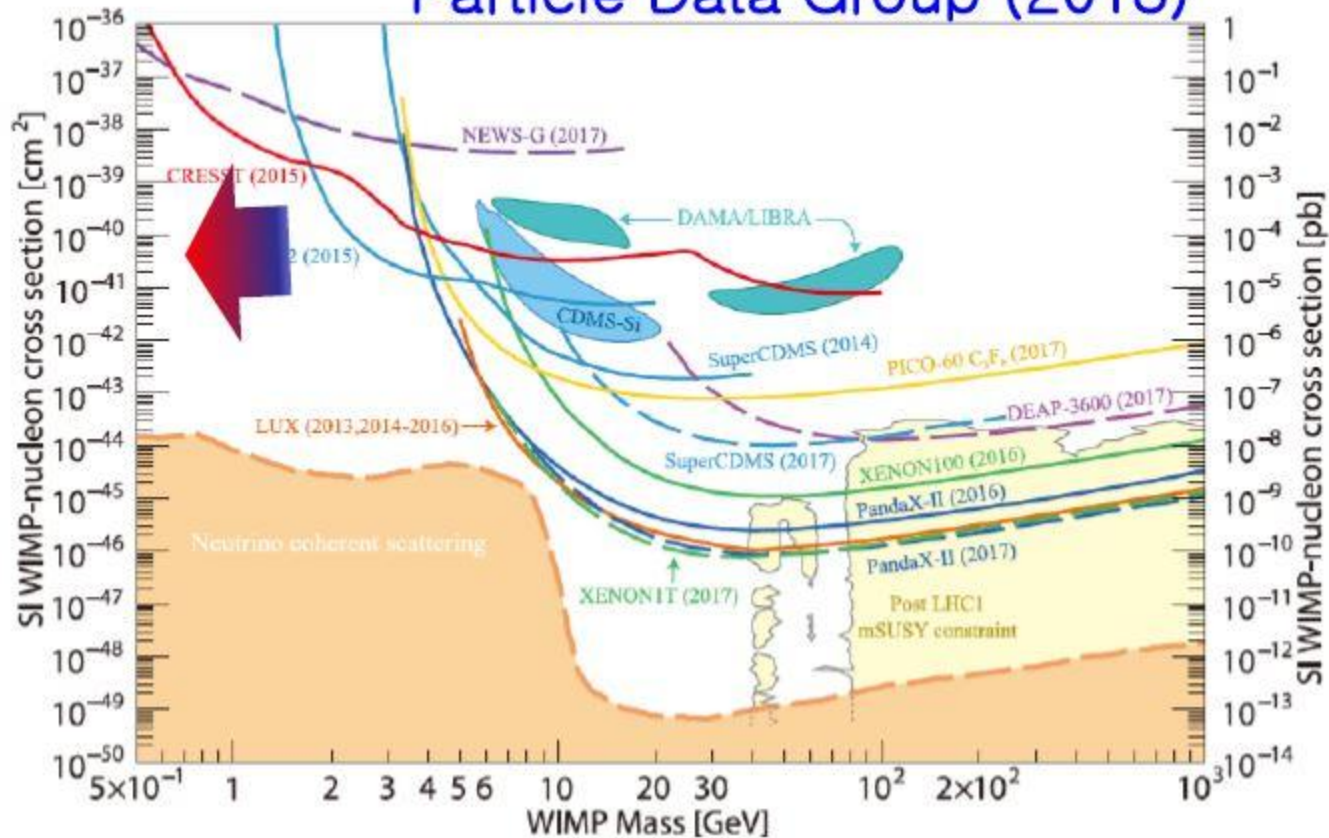


- Well progressed for high mass search to  $10^{-46} \text{cm}^2$  @ 50 GeV
- Exploring low-mass dark matter
- Unresolved signal from DAMA



# Low-mass searches

Particle Data Group (2018)



- Well progressed for high mass search  $10^{-46} \text{cm}^2$  @ 50 GeV
- Exploring low-mass dark matter
- Unresolved signal from DAMA



**DAMA**

**SABRE**

**COSINUS**

★ Gran Sasso + Australia

**KIMS (+ DM-Ice)**

**COSINE-100**

★ Yangyang ★ Kamioka

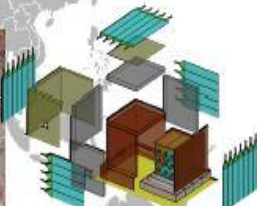
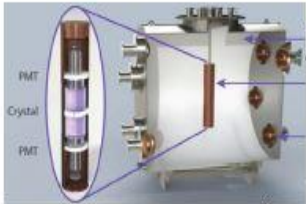
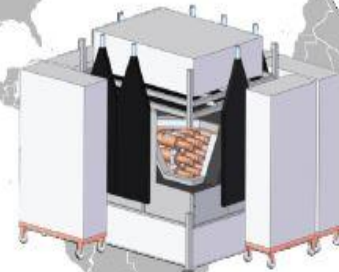
**PICOLON**



**ANAIS**

★ Boulby

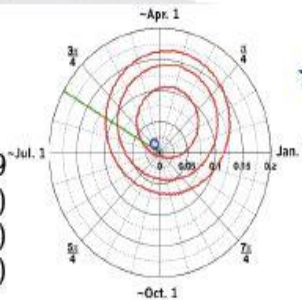
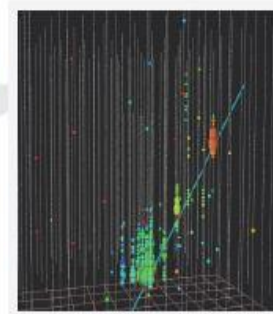
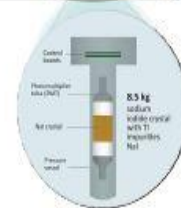
★ Canfranc



Eur.Phys.J. C **78** 107 (2018)  
 Eur.Phys.J. C **77** 437 (2017)  
 JINST **13** T02007 (2018)  
 Phys.Rev. D **90** 052006 (2014) (Csl)

**DM-Ice17**

★ South Pole



Astropart. Phys. **35** (2012) 749  
 Phys. Rev. D **90** 092005 (2014)  
 Phys. Rev. D **93** 042001 (2016)  
 Phys. Rev. D **95** 032006 (2017)

# Helium Migration through Photomultiplier Tubes – The Probable Cause of the DAMA Seasonal Variation Effect<sup>§</sup>

Daniel Ferenc<sup>1,3,\*\*</sup>, Dan Ferenc Šegedin<sup>2,3</sup>, Ivan Ferenc Šegedin<sup>3</sup>, Marija Šegedin Ferenc<sup>3</sup>

(1) Department of Physics, University of California Davis, Davis CA, USA

(2) Department of Physics, University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA

(3) PhotonLab, Inc., Davis, CA, USA

**arXiv:1901.02139v2**

## ABSTRACT

The interpretation of the DAMA seasonal variation pattern as a Dark Matter (DM) effect rests on the assumption that all sources of variable background have been excluded from the measurement. We have identified an overlooked background that mimics the DM signature—a large, patently existing effect that has nothing to do with detection within the scintillators. This process takes place exclusively within the individual photomultiplier tubes (PMTs), with two familiar actors (thermionic electrons and helium atoms), two familiar processes (helium penetration of glass and ion afterpulsing), and a simple storyline: (a) After defeating the insulation of the DAMA detector, helium atoms from the variable local environment penetrate the PMTs' vacua; (b) Thermionic electrons from the PMT photocathode ionize helium atoms; (c) Secondary electrons from each helium ion's impact in the photocathode form an afterpulse, and thus effectively boost and extend the waveform. We demonstrate that the accidental coincidences of such inflated dark-noise waveforms, originating from any pair of PMTs, mimic scintillation events at a rate of  $\sim 1$  cpd/kg/keV, which is consistent with DAMA's result. The reported seasonal variation of  $\sim 1\%$  thus implicates a variation of the helium concentration in the local environment that can cause a  $\sim 1\%$  modulation of the helium pressure within the PMTs. We predict that the DAMA detector with a modified readout logic – blinded for the DM-like scintillation events – will measure the same, helium-driven seasonal variation pattern as the original detector.



清华大学  
Tsinghua University



# CDEX的过去

➤ Per-CDEX

2002-2004	TEXONO + KIMs
2004-2008	DM at y2L

➤ CDXE 10年

2008 - 2010	CJPL I 建设
2010 - 2014	实验系统建立
2014 - 2018	物理运行与成果

# 2008年建议建设锦屏山地下实验

2008年 三方合作会报告 三亚



## 暗物质地下实验的要求

- 至少1公里的等效岩石厚度  
(屏蔽掉宇宙线等干扰信号)
- 穿山隧道或地下矿井  
(在交通、运送材料等方面, 隧道具有明显的优越性)

需要指出:

暗物质地下实验不是大型实验, 是小型非加速器实验!  
几百平方米的实验面积

中国的机遇——锦屏山隧道

## 世界第二深埋隧道锦屏山隧道全线贯通

记者从三峡水电开发有限公司获悉, 国家重点工程雅砻江锦屏水电站的控制性工程锦屏山隧道日前顺利贯通, 该隧道将长150公里的锦屏大河弯截弯取直, 使锦屏一、二级水电站实现最短距离连接, 这为雅砻江中游几座大型水电站的外来物资运输及梯级电站的运行管理提供了安全便捷的通道。

据了解, 2004年1月开工建设的锦屏山隧道工程, 位于四川省凉山彝族自治州木里藏族自治县、盐源县、吴宁县交界处的雅砻江干流上, 由两条长约17.5公里的平行单车道隧道组成, 它既是为锦屏一级、二级、卡拉、杨奔沟、孟底沟等水电站服务的特长交通隧道, 又是锦屏二级水电站引水隧洞施工的超前勘探洞和施工辅助洞, 作为国内第一、世界第二的深埋隧道, 该隧道最大埋深2375米, 埋深大于1500米的隧道段占总长的73.1%。四川省科学技术信息研究所调查表明, 锦屏山隧道工程创造了隧道施工的多项国内纪录和世界纪录, 为锦屏二级水电站平均长达16.67公里的四条引水隧洞和一条排水洞的施工, 积累了宝贵经验。

据介绍, 锦屏大河弯是我国著名的三大河弯之一, 根据规划, 锦屏大河弯河段分锦屏一级水电站和锦屏二级水电站两级开发, 作为雅砻江下游龙头梯级电站的锦屏一级水电站, 按高坝大库开发, 混凝土双曲拱坝坝高305米, 是世界第一高拱坝; 锦屏二级水电站利用锦屏一级的尾水, 通过开挖隧洞, 截弯取直, 引水发电, 装机480万千瓦, 具有世界最大规模的引水隧洞群, 是雅砻江上水头最高、装机规模最大、效率最好的一座水电站。



锦屏大河湾地理位置示意图



## 锦屏山隧道

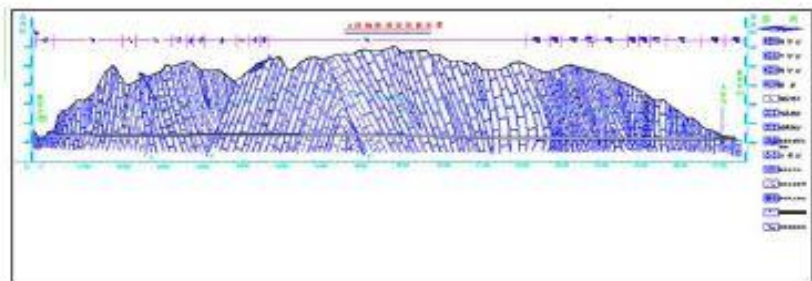
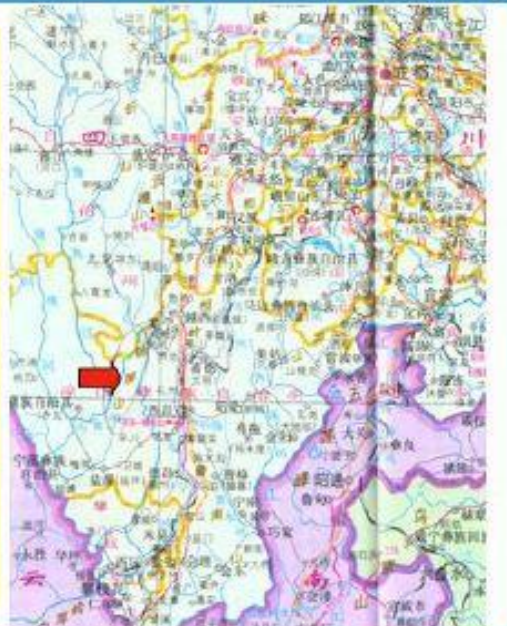
四川西部, 雅砻江大拐弯处

距成都 350km  
距西昌 70km  
距成都-西昌高速 30km

锦屏山主峰: 4193m  
隧道最深处: 2375m

隧道长: 17.5km  
埋深大于1500m洞段:  
占总长73.1%

两条平行单车道  
每条隧道直径: 12m



2009年5月8日

# 清华大学与二滩公司（现雅砻江流域水电开发有限公司） 签订合作协议



2011.1.27-29

2011年中国暗物质理论与实验(CDEX)研讨会







清華大學  
Tsinghua University



# CDEX的现在



- 2009年建立, 现在约70位科学家和研究生
- 利用点接触P型高纯锗探测器直接探测轻暗物质



# 从03年起准备、05年在Y2L用5g锗探测器直接探测暗物质DM

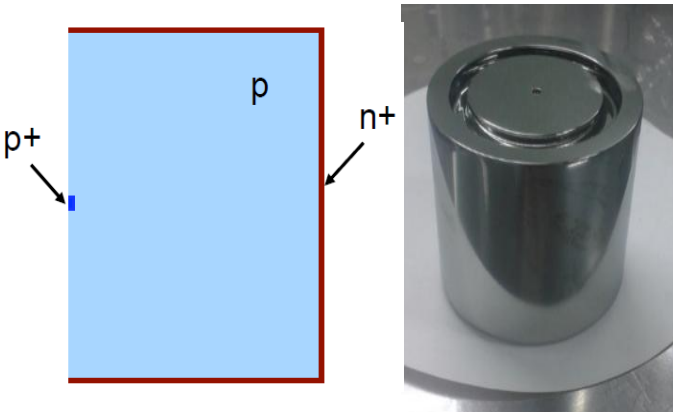
**CDEX-1** : 从11年起研发高纯锗探测器, 研究背景

**CDEX-10**: 从16年起实验浸泡在LN<sub>2</sub>中的锗阵列

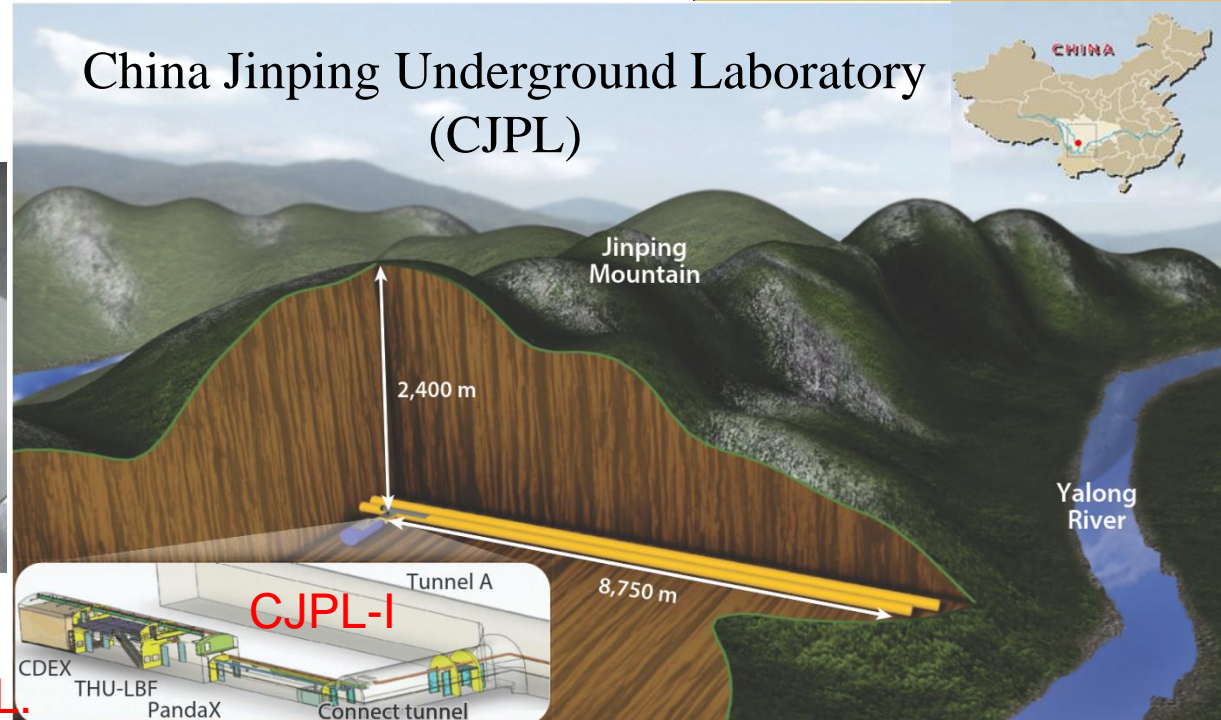
**CDEX-10X**: 自制锗晶体和锗探测器



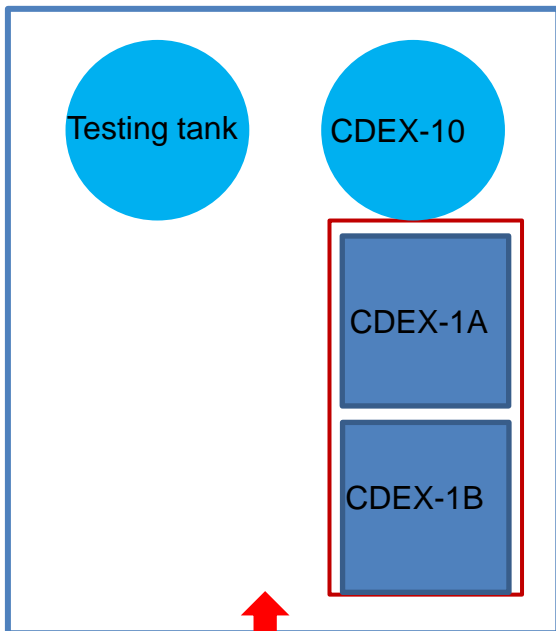
P-type Point-Contact (PPC)  
Germanium detector



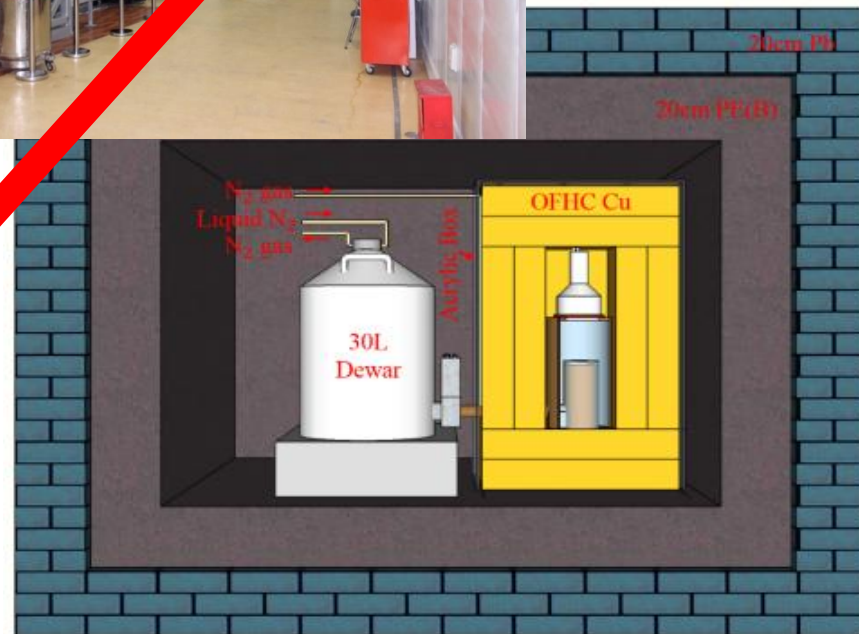
China Jinping Underground Laboratory  
(CJPL)



Direct detection of low-mass  
WIMPs by Ge detector at CJPL.



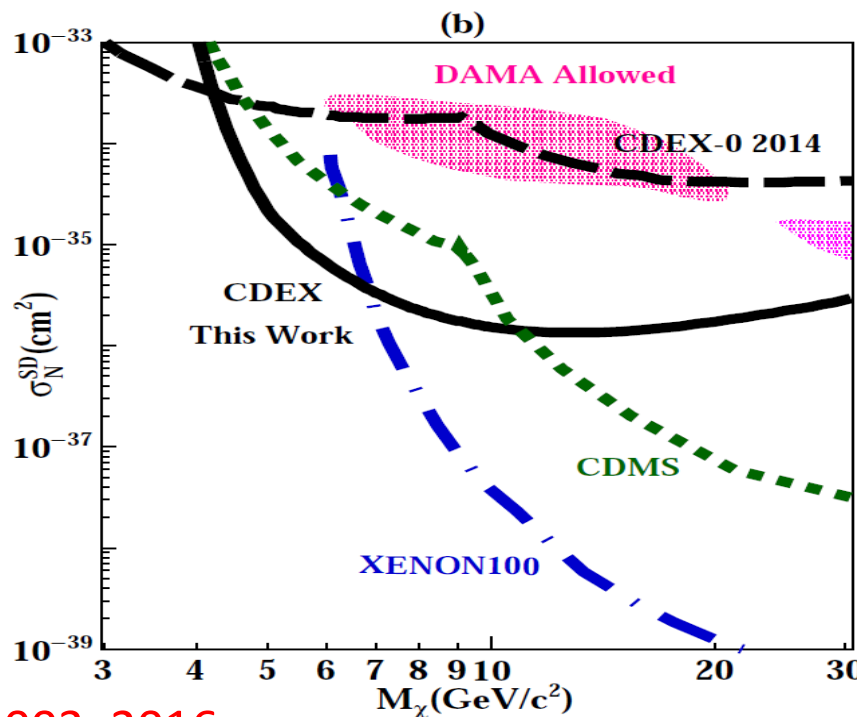
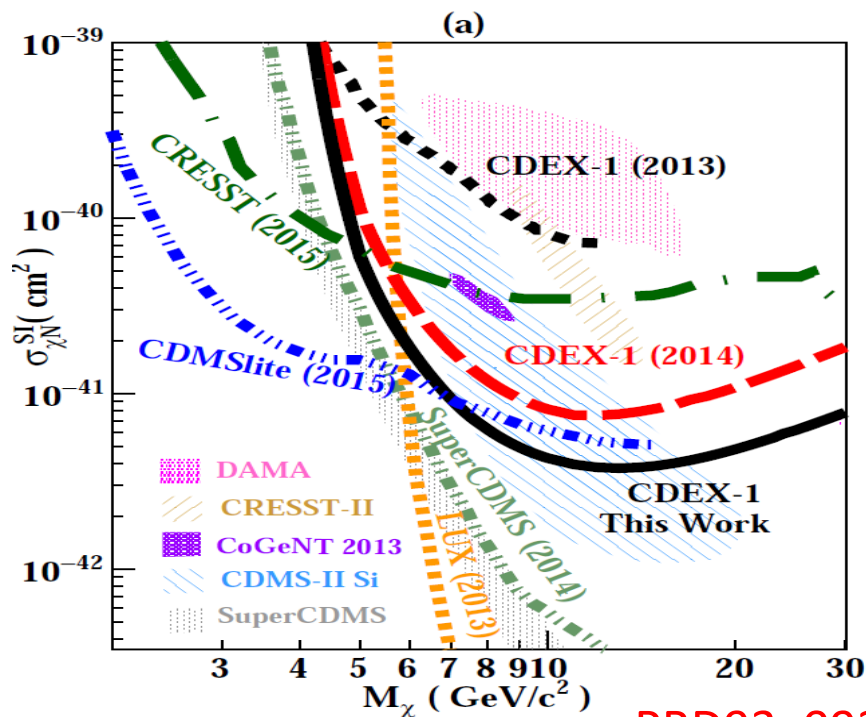
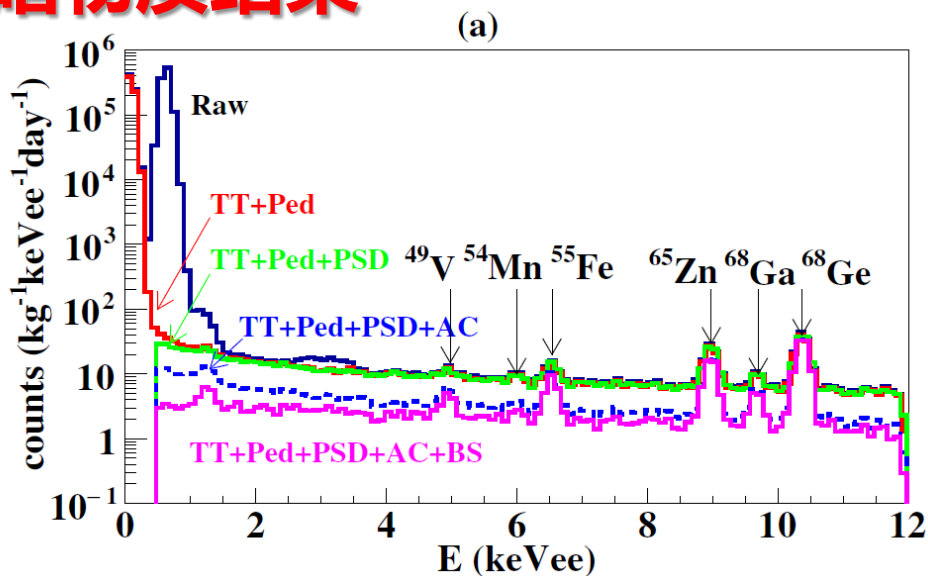
- CDEX-1A(试验, 2011)→1B(升级, 2013)
- 传统单体~1kg PPC Ge 探测器
- 低本底铅和铜被动屏蔽+ NaI反符合探测



CDEX-1A&B: 1kg PPC Ge×2

# CDEX-1A 暗物质结果

- > 500天运行,  $\sim 336 \text{ d}\cdot\text{kg}$  数据
- 能量阈值: 475 eVee
- 体/表事例区分
- 宇生放射性扣除
- 改进SI灵敏度;
- 6 GeV以下最强限制



# CDEX-1A 其它结果

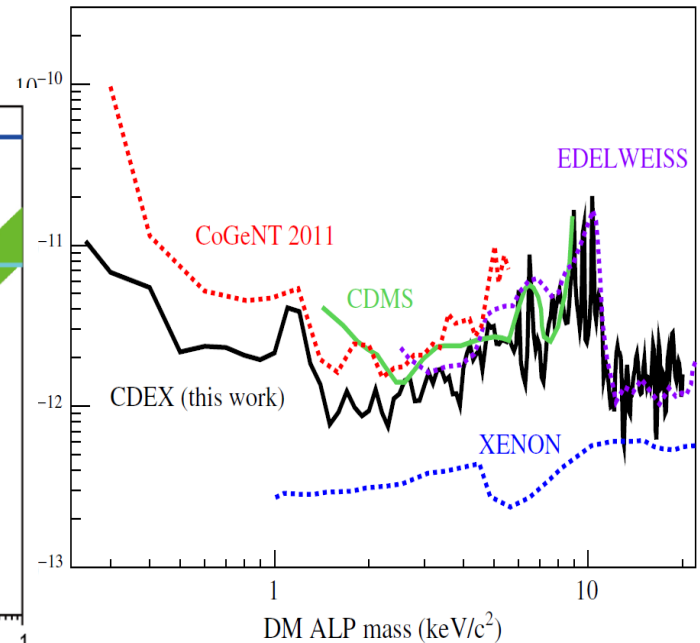
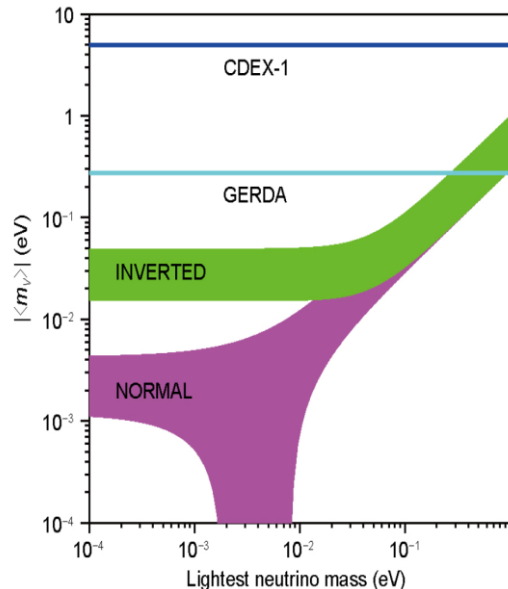
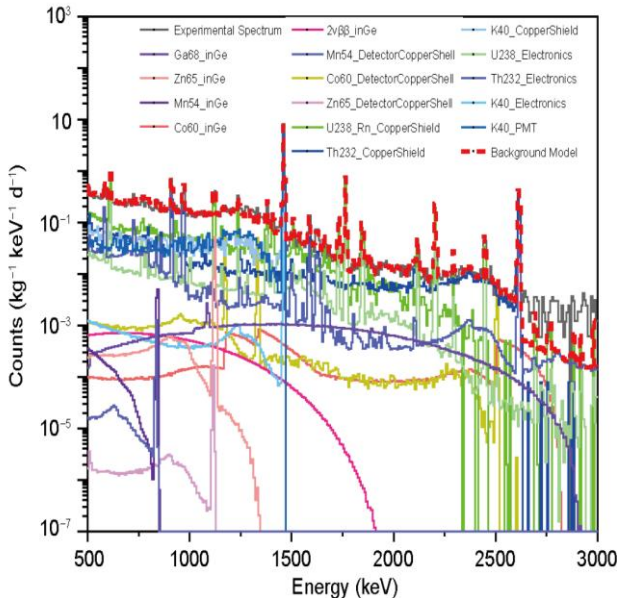
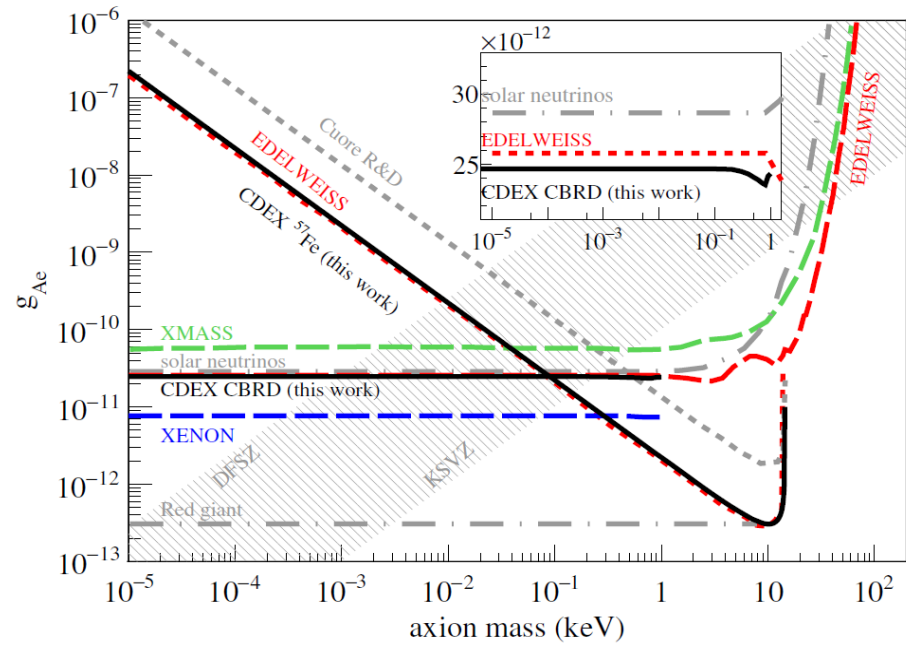
PRD95, 052006, 2017

- Axion (335.6 kg day data)
  - Solar axions: CBRD processes and  $^{57}\text{Fe}$  M1 transition;
  - ALPs: 1 keV下更严格的限制

- $0\nu\beta\beta$  (304 kg·day data)

- Natural Ge crystal;

$$T_{1/2}^{0\nu} \geq 6.43 \times 10^{22} \text{ yr}, 90\% \text{ C.L.}$$

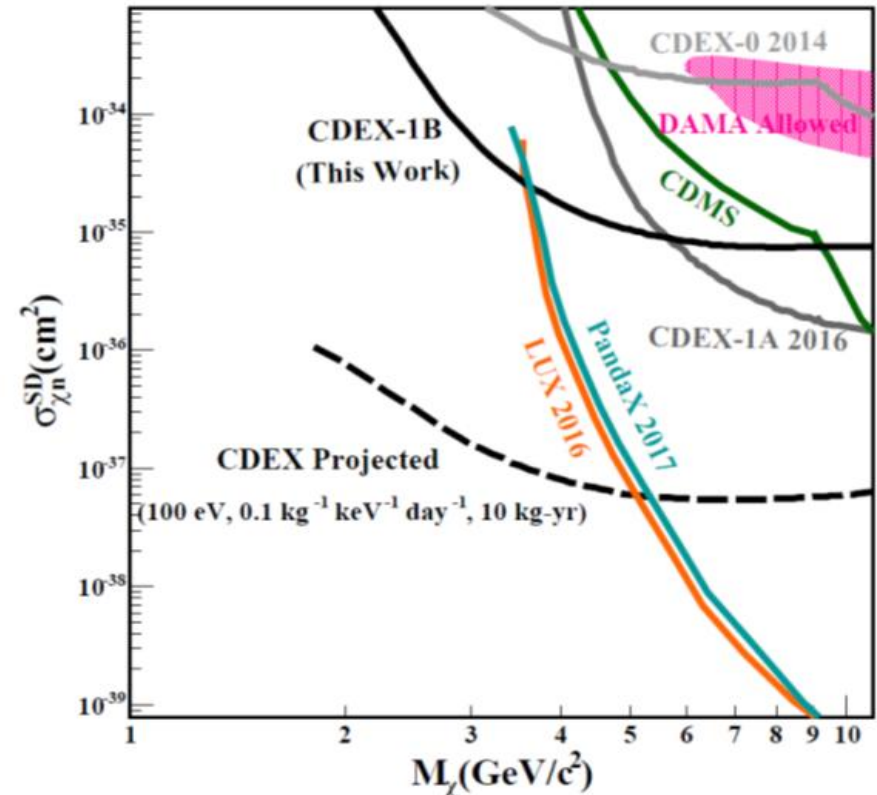
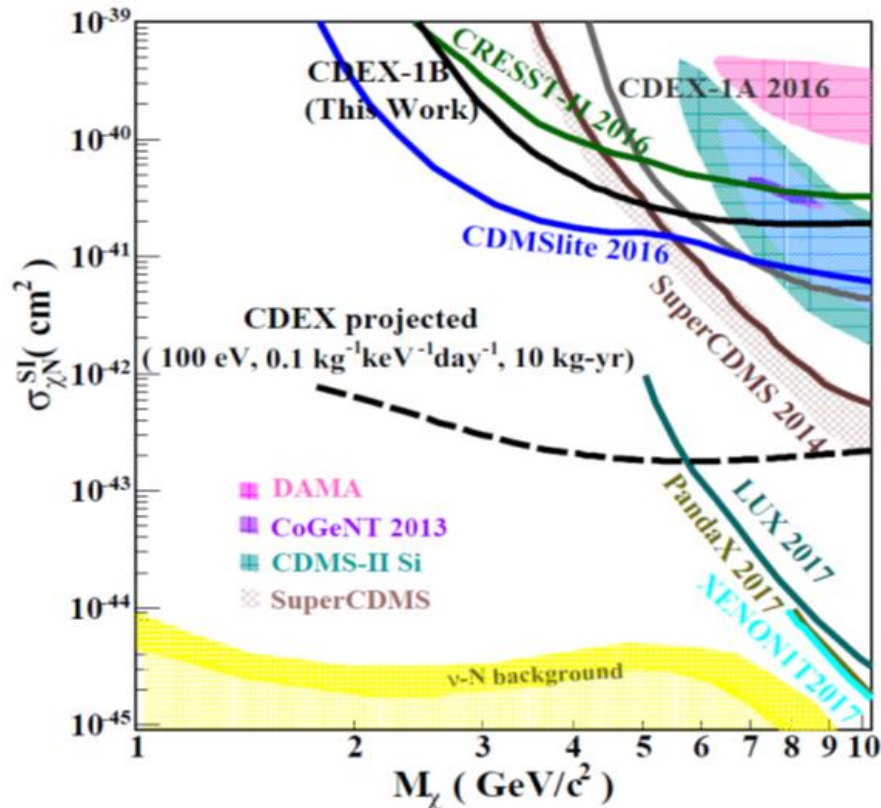


# CDEX-1B 暗物质结果

- 升级探测器、降低电子学噪声和材料背景
- 运行3.3年, 总共737.1 kg·d数据
- 达到160 eVee 能量阈值
- 改进灵敏度到2 GeV/c<sup>2</sup>

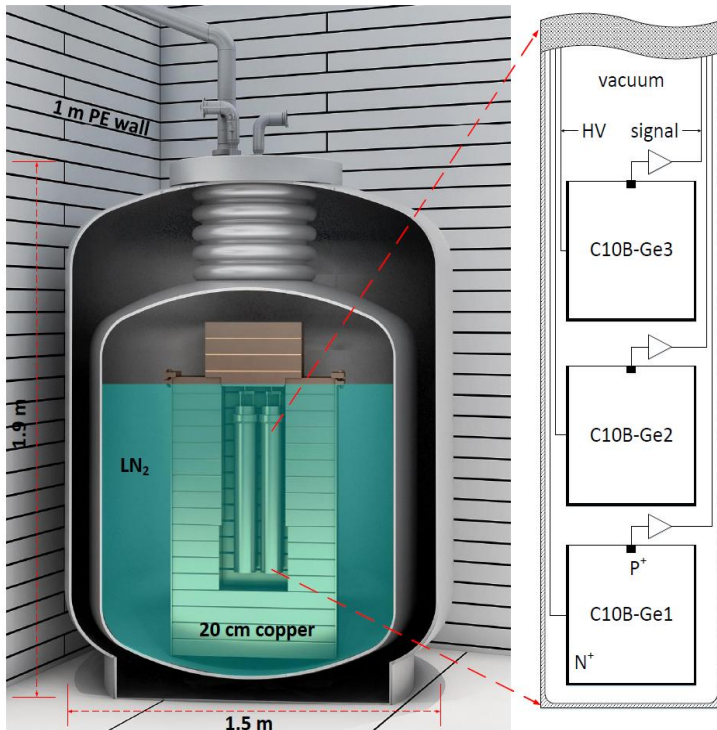
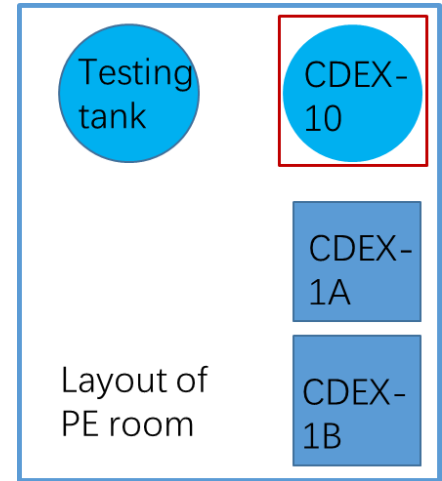
Detector	FWHM of pulser
CDEX-1A	130 eVee
CDEX-1B	80 eVee

CPC 42, 023002, 2018



# CDEX-10

- 阵列探测器: 3串每串三个, 全部约10kg
- 直接浸泡在  $\text{LN}_2$
- 为未来百公斤及吨级实验做测试

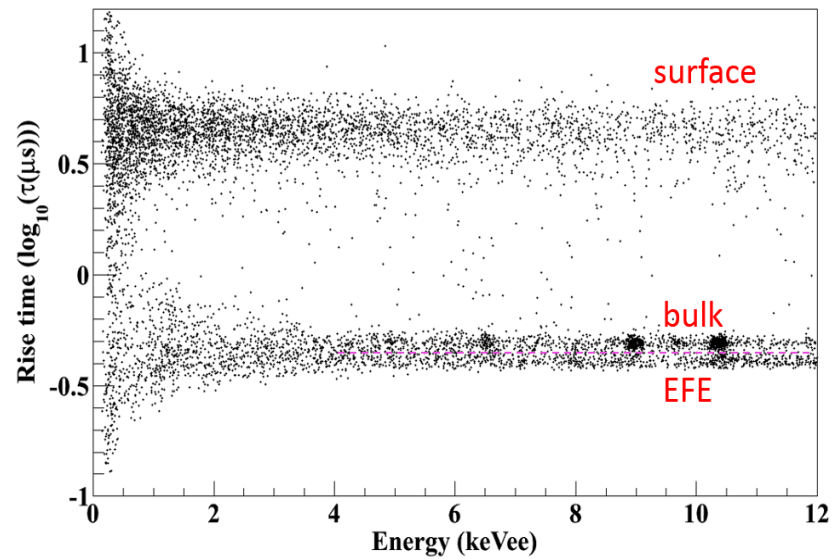


**CDEX-10: ~10kg PPC Ge array**

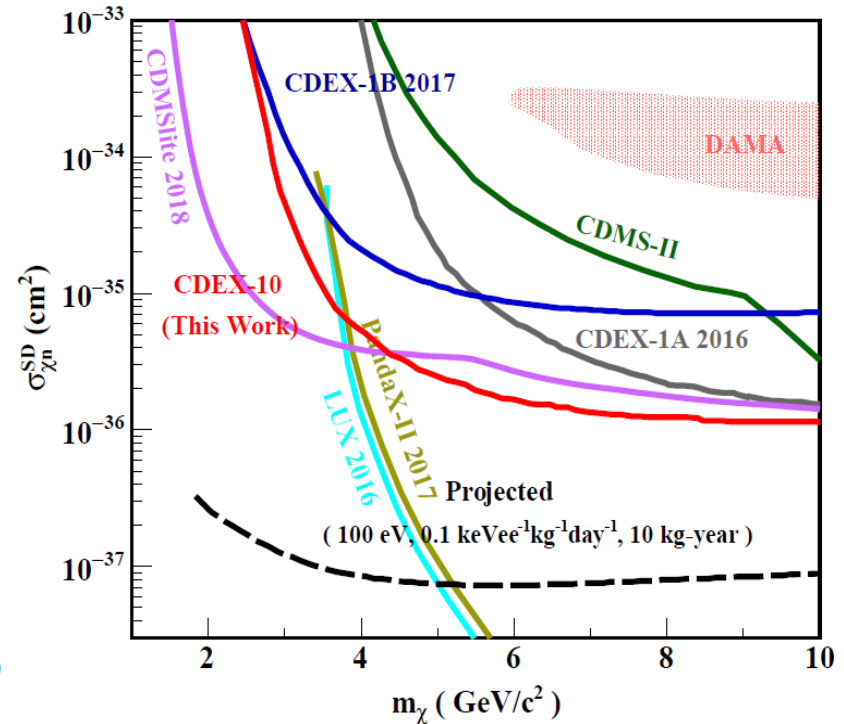
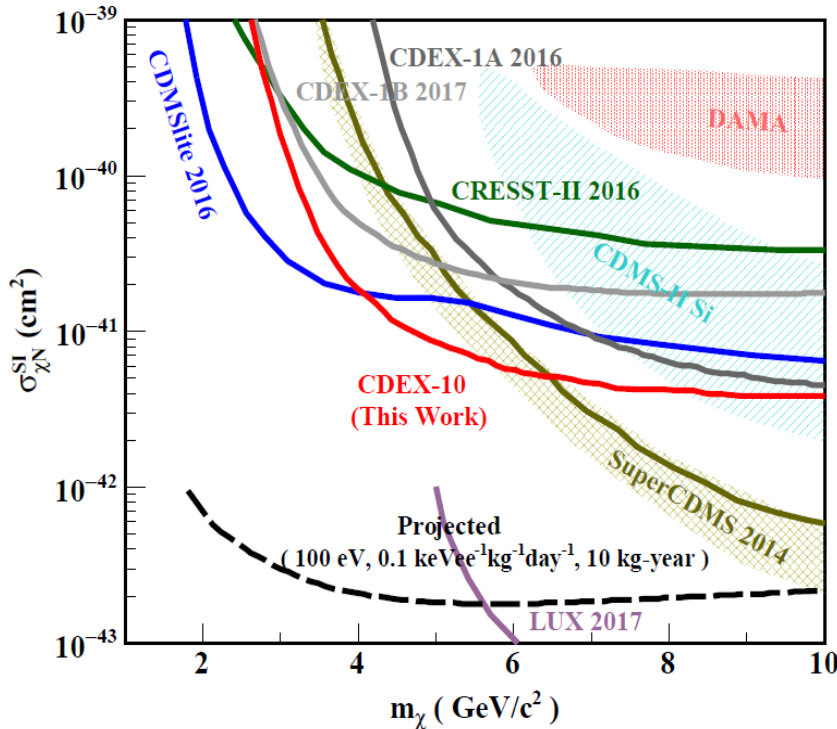


# CDEX-10 暗物质结果

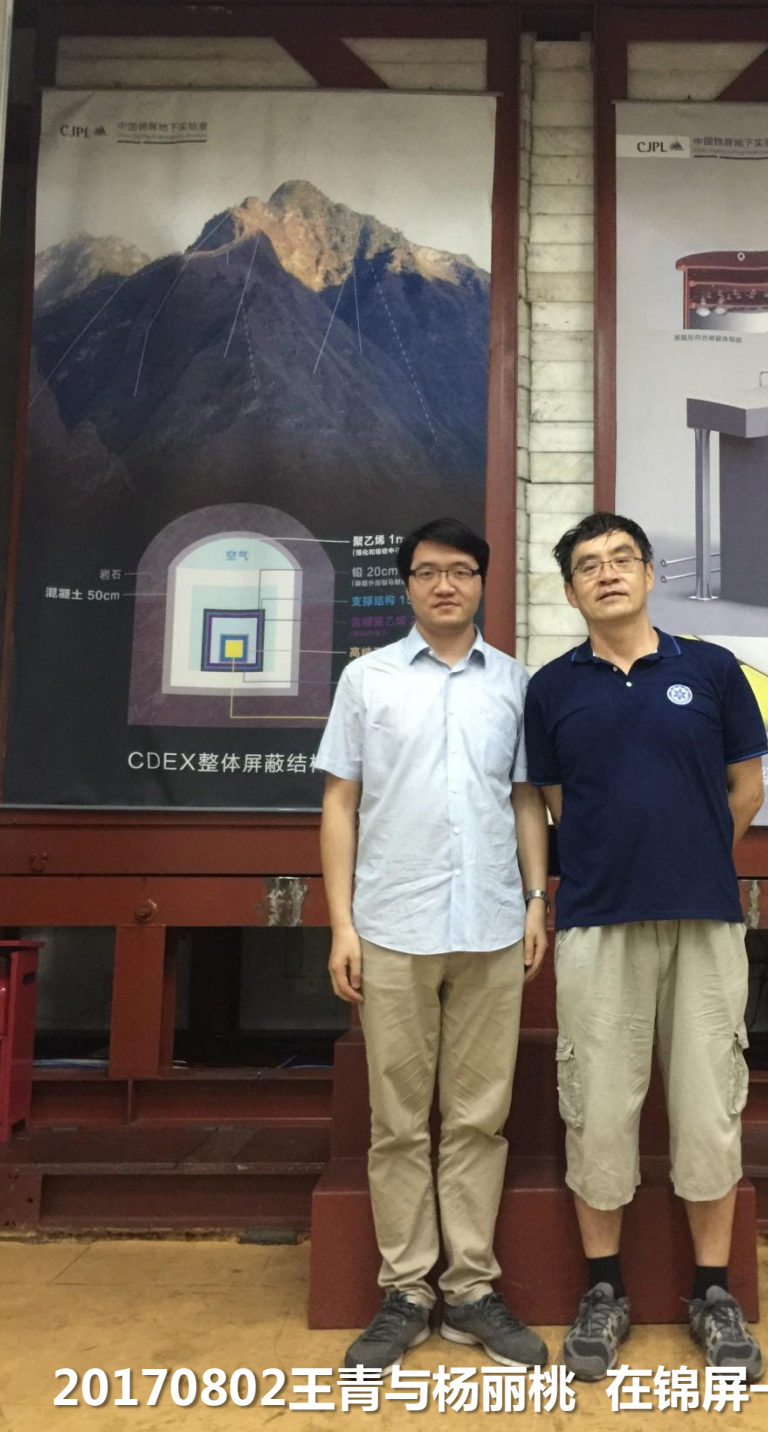
- 首个 102.8 kg·day的结果， 阈值160eV
- 背景：2 cpkkd @ 2-4 keV
- 2018年6月在4-5 GeV/c<sup>2</sup>区SI的限制最强
- 观测到体超快事例



*PRL 120, 241301, 2018*



王青的博士—杨丽桃，17年毕业，现在CDEX做博士后



20170802王青与杨丽桃 在锦屏一期实验室



极高纯锗阵列探测器系统



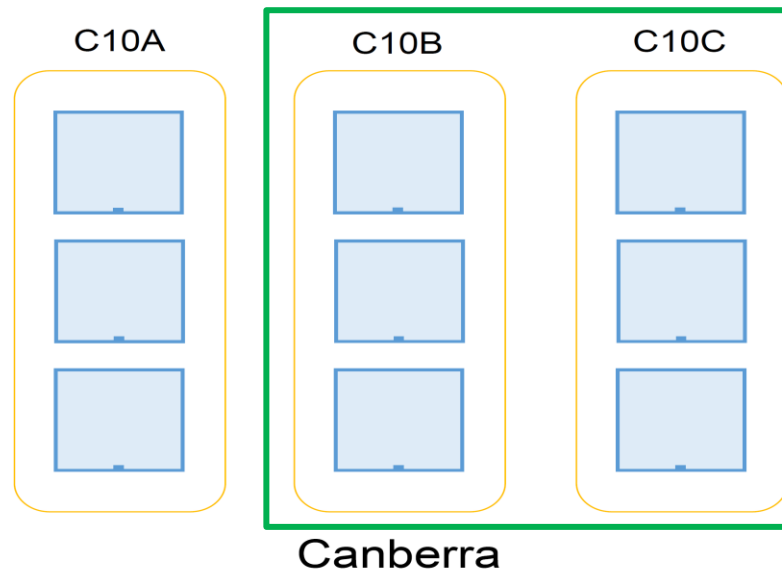
王青的博士—陈楠



王青的博士—马菁露

# CDEX-10 升级

- C10A-1 : *Preliminary*
  - 新的 Cu 罐
  - 新的两端电子学...
- 正在 CJPL-I测试

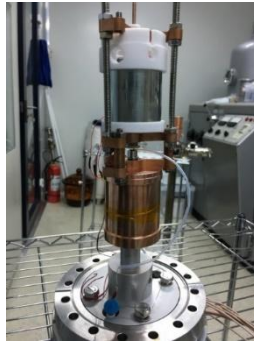
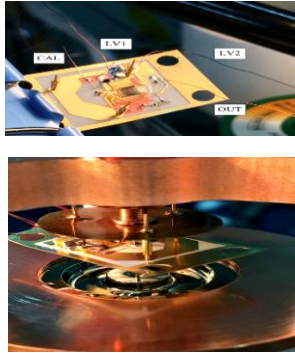
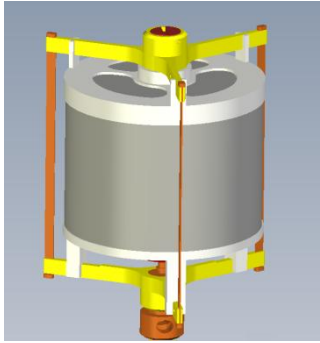


C10A-1 参数

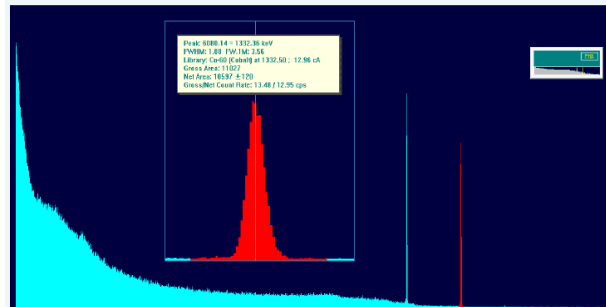
直径	62mm
高度	62mm
高压	+2500V
FWHM	70eV @Pulser
	430eV @122keV



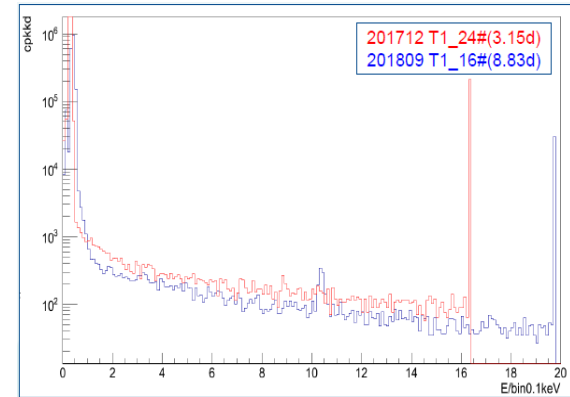
- 自主研发的世界第一个ASIC-PPCGe，能量分辨率达到商业水平，阈值~300eV，**看到了Ge-68宇生X射线**；
- 高纯锗探测器：重要进展



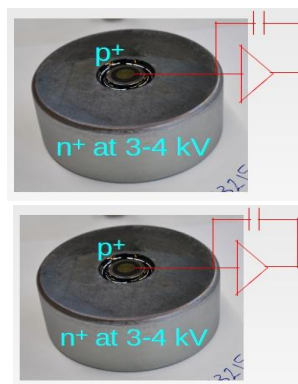
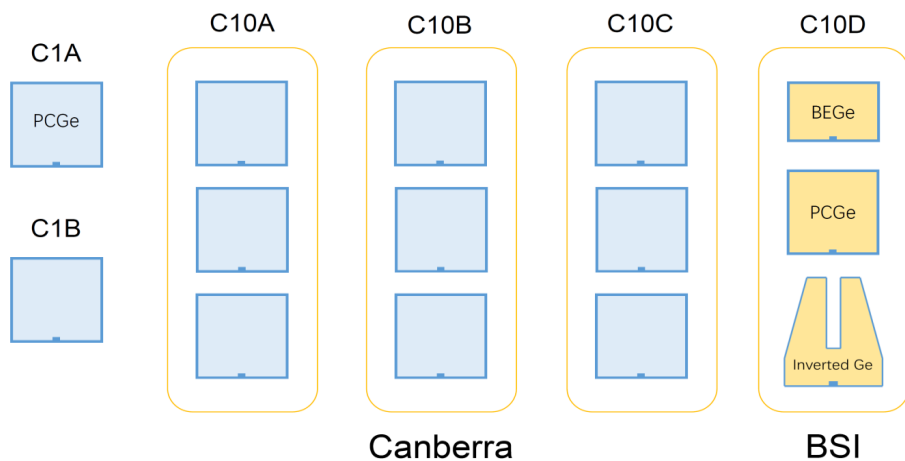
- Commercial Ge crystal;
- **Structure machining;**
- **Li-drift and B-implanted;**
- **Home-made ULB PreAmp;**
- **Underground EF-Cu;**
- **Underground assemble;**
- **Underground testing...**



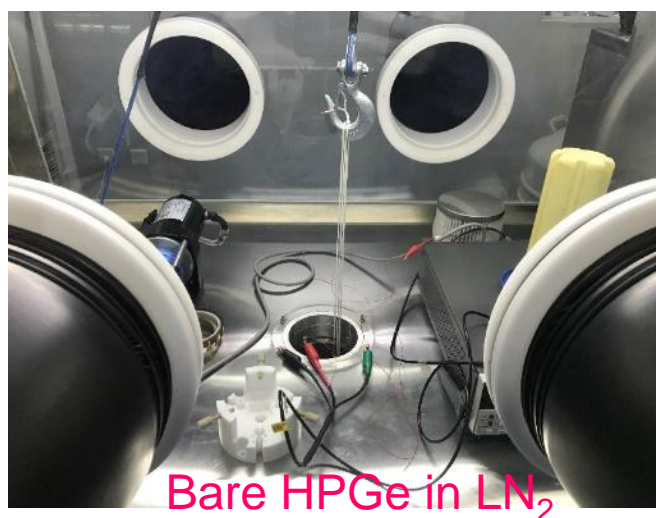
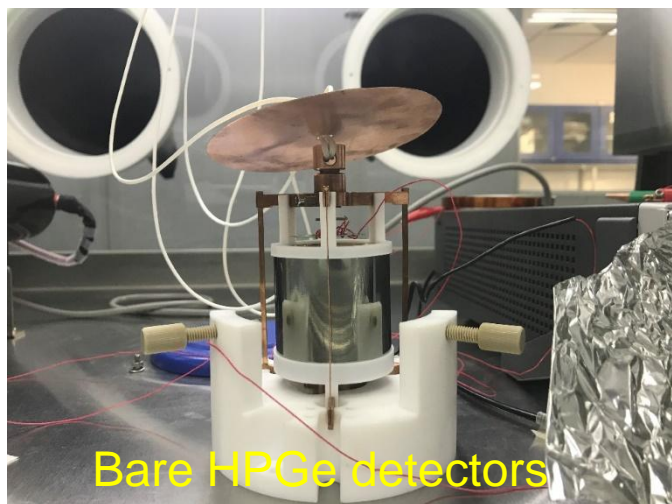
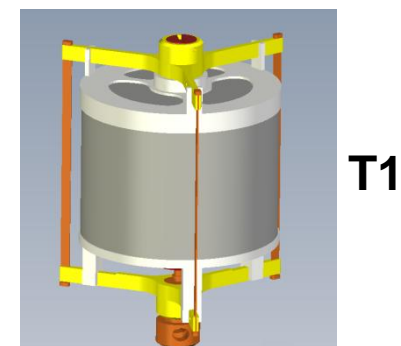
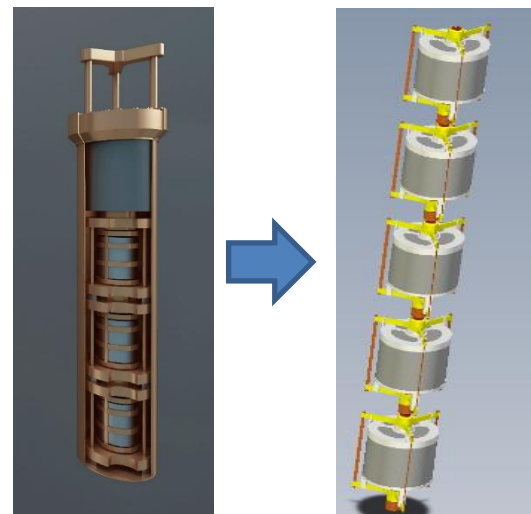
Co-60 energy spectrum  
FWHM ~ 1.88keV @ 1332.5keV



- 已购置的21kg的高纯锗探测器；
- 几个自制探测器；
- 逐步移到CJPL-II液氮恒温器中。



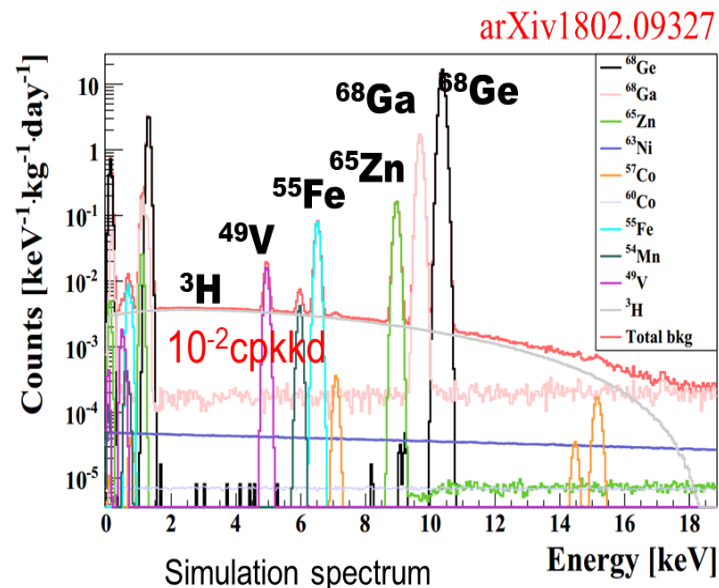
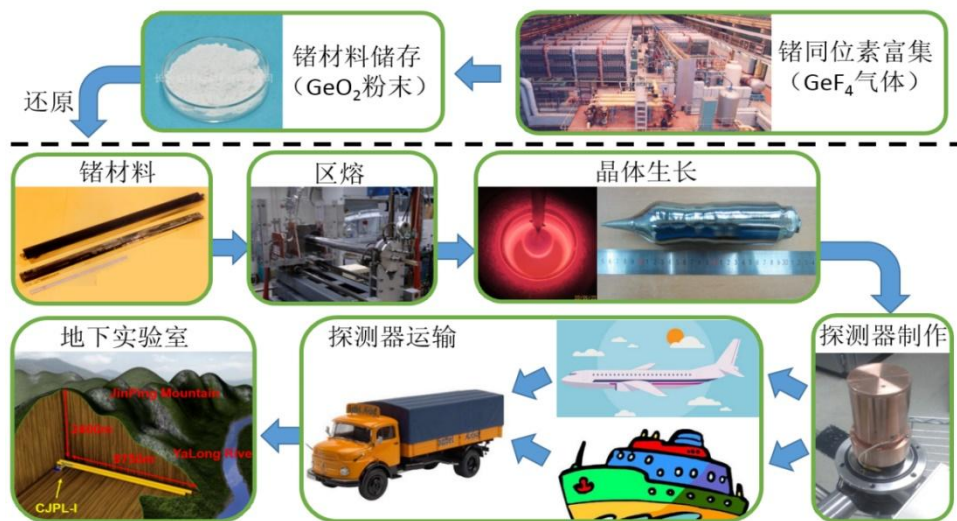
ORTEC 2+5





# 晶体宇生本底抑制研究

- 详细模拟高纯锗探测器从原料处理、制备、运输和探测器研制等各个环节的本底控制，建立了探测器生产标准流程；
- 两个月地面探测器制备时间可以把H-3本底控制在  $0.01\text{cpkcd}@2-4\text{keV}$  水平；
- 未来地下晶体生长和探测器制作可以进一步降低本底水平到





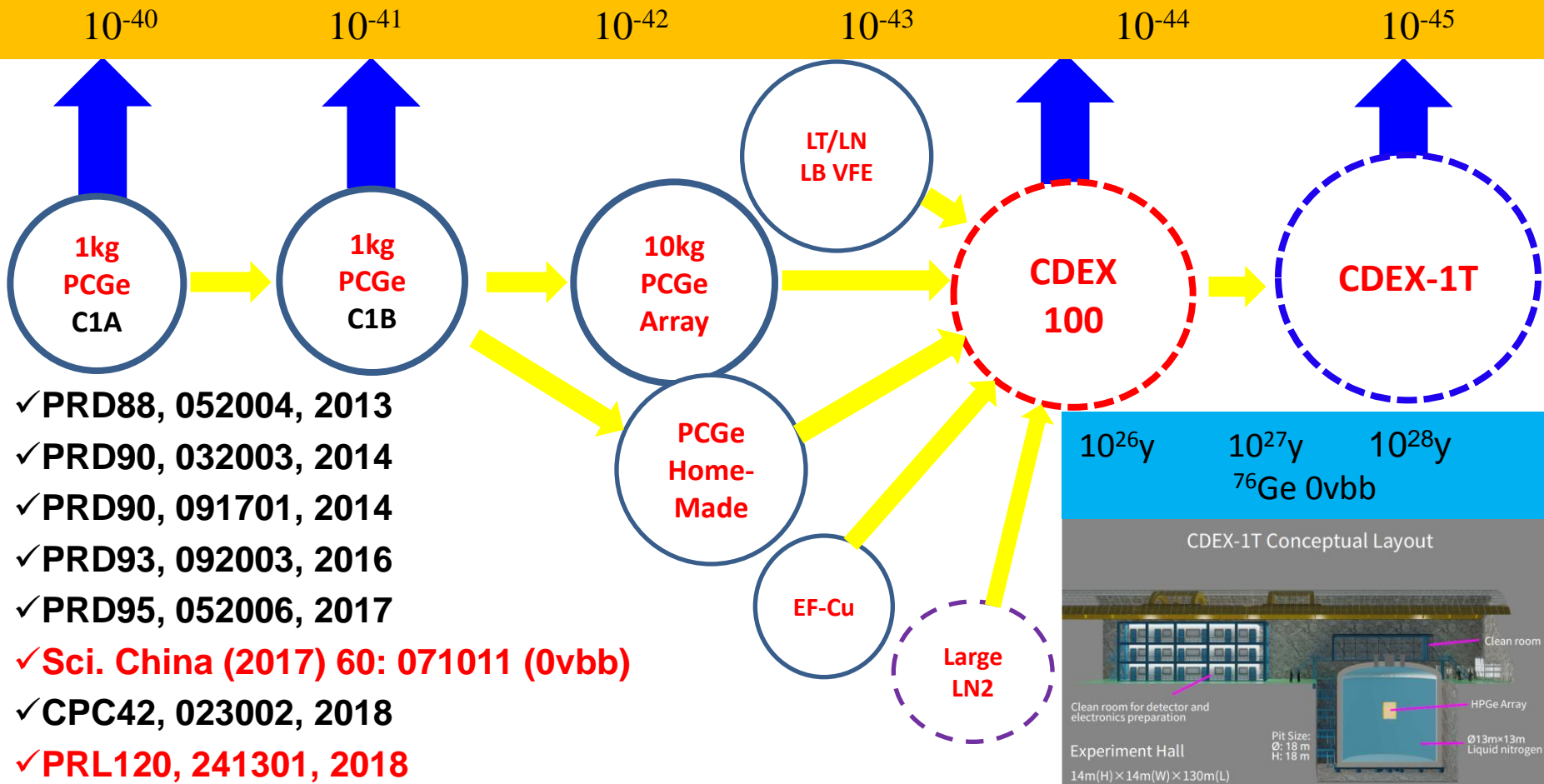
清華大學  
Tsinghua University



# CDEX的未来

# CDEX实验路线图

DM sensitivity (  $\text{cm}^2$  )



- ✓ PRD88, 052004, 2013
- ✓ PRD90, 032003, 2014
- ✓ PRD90, 091701, 2014
- ✓ PRD93, 092003, 2016
- ✓ PRD95, 052006, 2017
- ✓ **Sci. China (2017) 60: 071011 (0vbb)**
- ✓ **CPC42, 023002, 2018**
- ✓ **PRL120, 241301, 2018**

CDEX-1

CDEX-10+X

**CDEX-100**

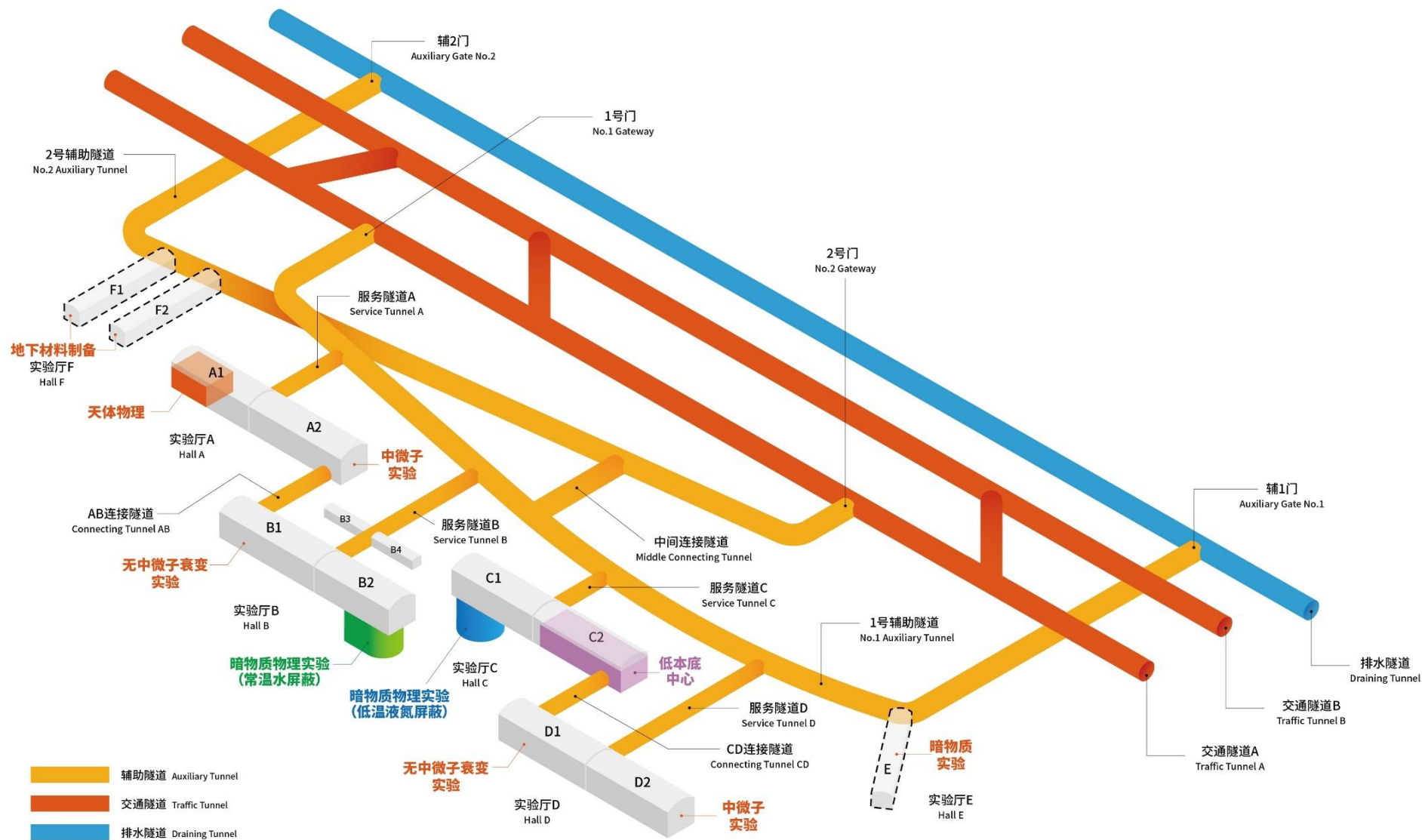
CDEX-1T

CJPL-I

CJPL-II



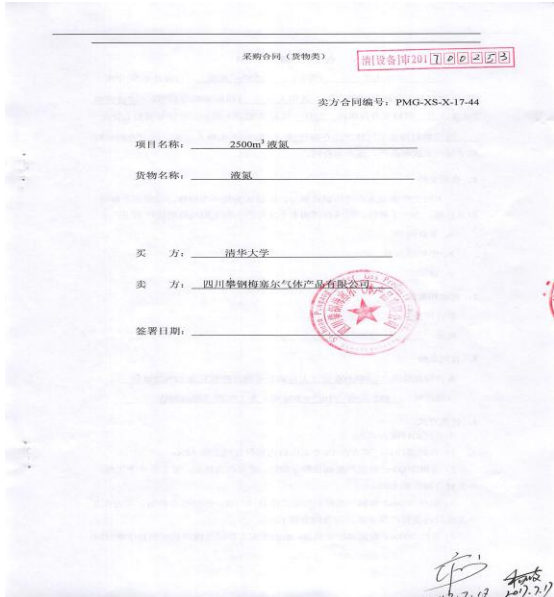
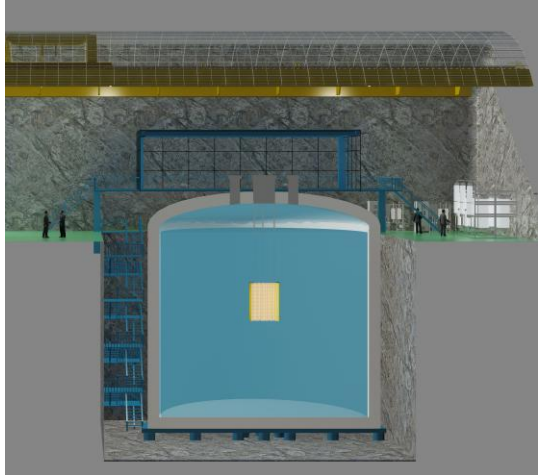
# 国家“十三五”重大科技基础设施







- 液氮恒温器完成安全审批流程，正在建设，预计今年上半年完成
- 液氮介质的原生放射性、氦等放射性核素的测量和去除正在研究。



液氮采购合同

**四川省安全生产监督管理局**

川安监函〔2018〕151号

**四川省安全生产监督管理局  
关于对凉山州安全生产监督管理局  
有关行政审批事项的复函**

凉山州安全生产监督管理局：  
你局《关于锦屏地下实验室储存使用危险化学品有关问题的请示》（凉安监〔2018〕31号）收悉。经研究，现将有关事项复函如下。

一、按照《危险化学品建设项目安全监督管理办法》（原国家安全监管总局令45号，第79号修正）有关规定，危险化学品建设项目安全审查是指审查由国务院及其投资主管部门（发展改革委和经信部门）审批（核准、备案）的建设项目，而该项目是由科学技术部立项，且非经小试、中试和工业化试验后进入成熟生产工艺的建设项目，属科学实验性质的科研项目。故锦屏地下实验室储存使用危险化学品项目不适用原国家安全监管总局45号令。

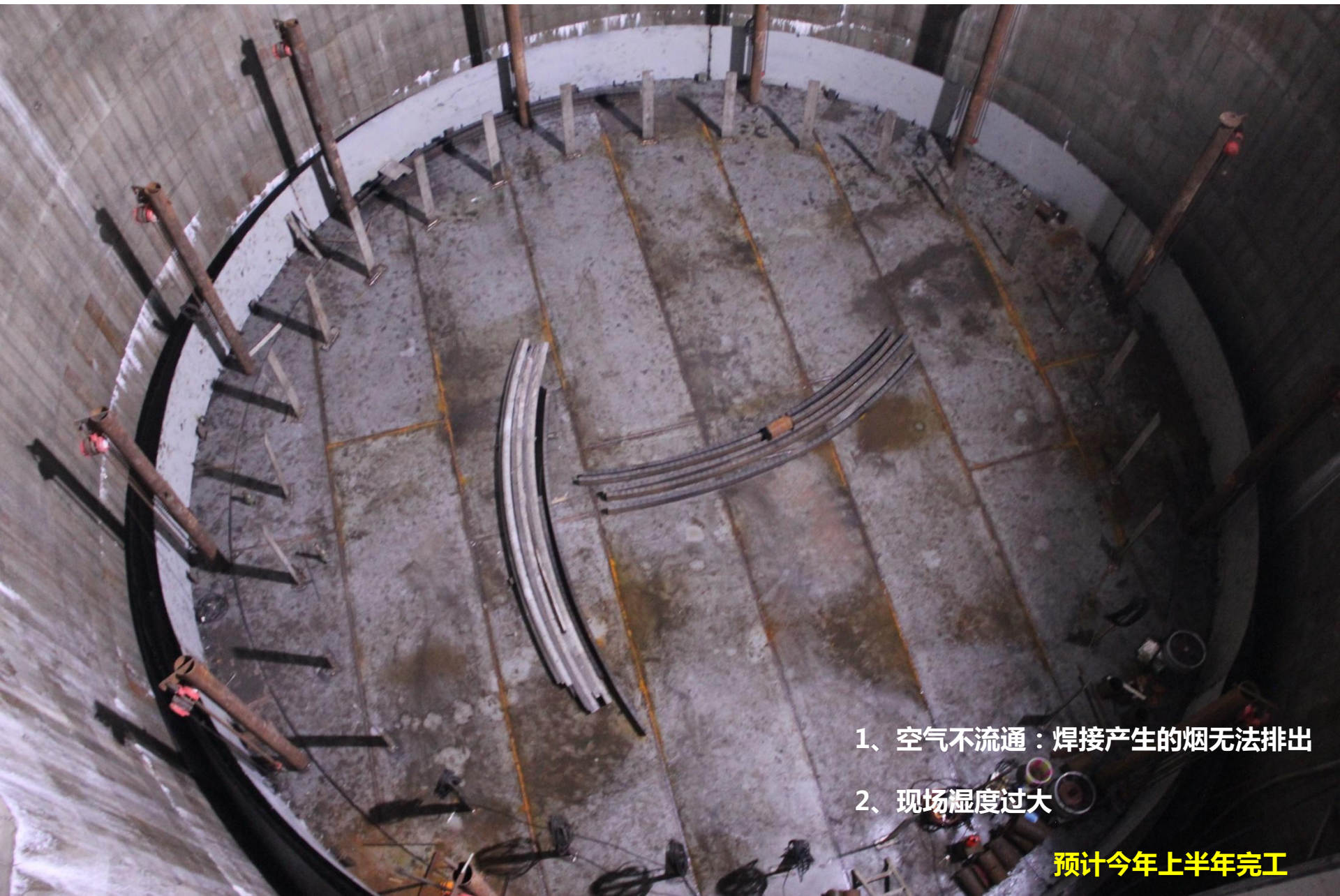
二、按照“管行业必须管安全”和“谁主管、谁负责”的原则，建议锦屏建设管理局根据科研项目安全管理的有关规定，对该项目安全设施开展“三同时”工作，严格安全设施设计审查和验收等

**四川安监局批复**



施工机具进场





1、空气不流通：焊接产生的烟无法排出

2、现场湿度过大

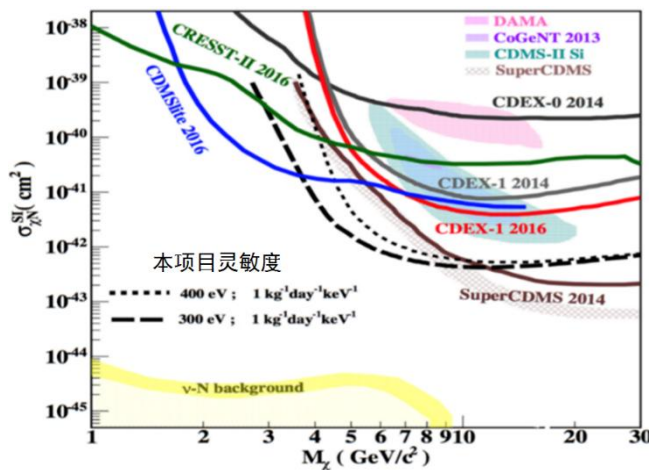
预计今年上半年完工



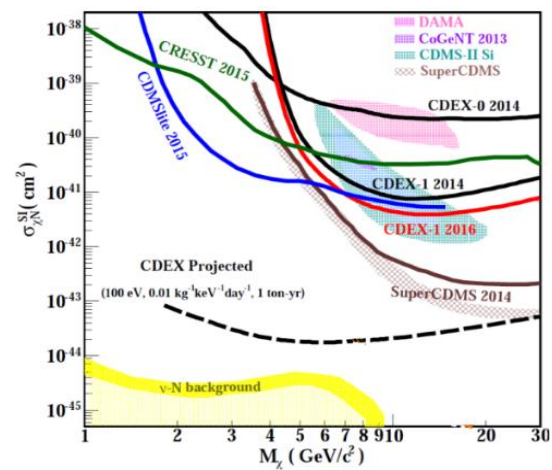


# 重点专项目标设置

- 暗物质探测灵敏度： $10^{-43}$   $\text{cm}^2$ 量级 ( $<10\text{GeV}$ )，低质量区间灵敏度国际领先；



自主突破关键技术之后才能继续向更低本底迈进



- 关键技术：本底降到 $<1\text{cpkkd}$  ( $3-5\text{keV}$ )

——自主掌握降低本底的关键技术；

- 暗物质理论研究

$$1 \text{ cpkkd} = 1 \text{ kg}^{-1} \text{ keV}^{-1} \text{ day}^{-1}$$

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”工程领导小组第一次会议

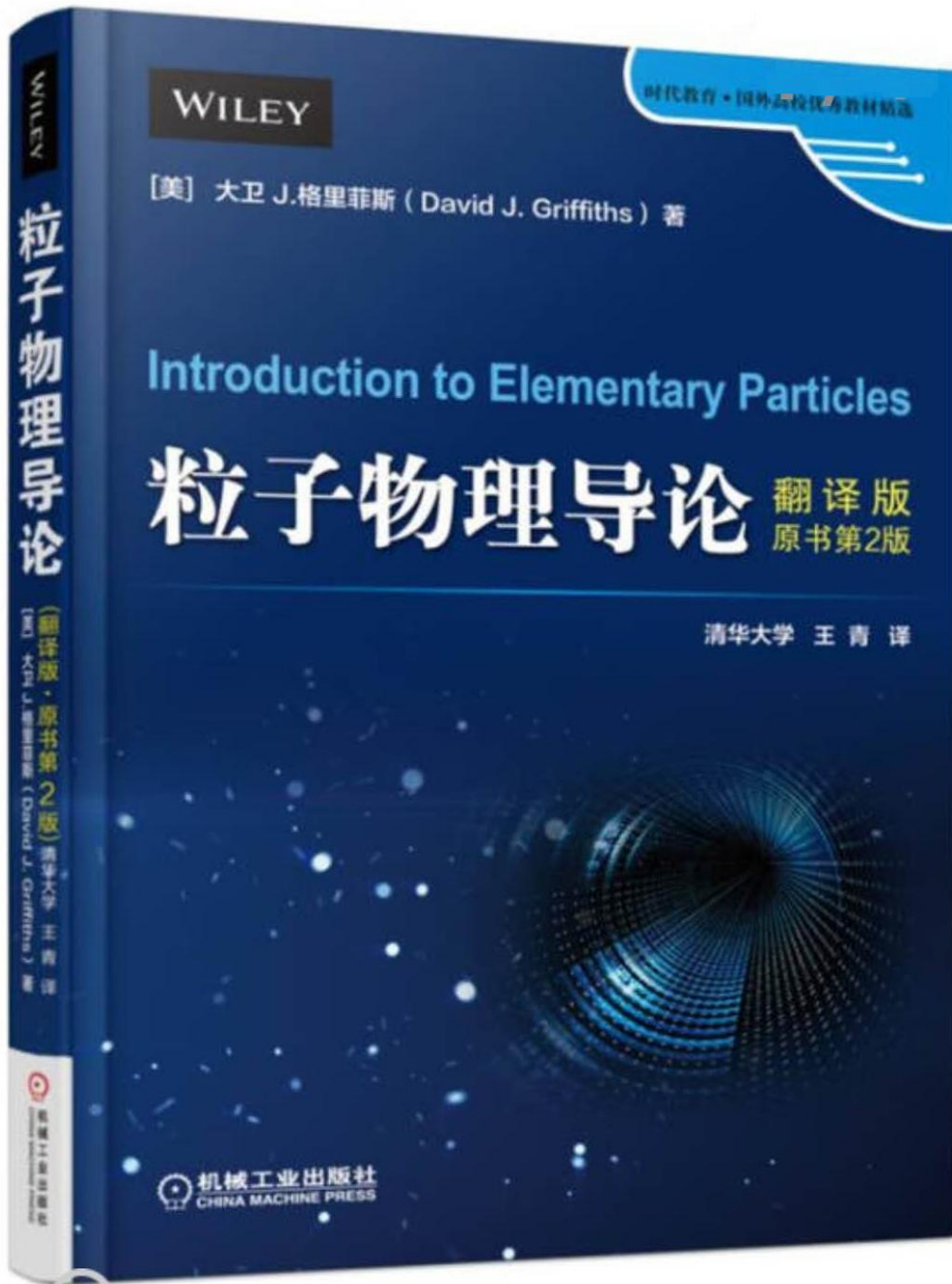


中国锦屏地下实验室建设的“十三五”国家重大科技基础设施“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”可行性研究报告已于2018年12月13日由国家发改委正式批准。该项目是清华大学作为独立法人单位承担的首个国家重大科技基础设施。

**2019年1月7日，清华大学召开了重大科技基础设施工程领导小组第一次会议。**项目专门成立了由清华大学各相关部处和雅砻江流域水电开发有限公司共同组成的工程领导小组。本人是其科学委员会的委员。







- 感谢大家厚爱已发售4千余本
- 原来过于仓促，翻译很烂
- 寒假期间进行第一次修订
- 欢迎大家帮忙指出错误
- 指出新错误可得一本免费新书

**Page87 Line2:** “因此，如果说氢原子中的电子占据轨道态 $|3\ 1\rangle$  和自旋态 $|1/2\ 1/2\rangle$ ，我再告诉你 $l=2$ ，...”应改为“因此，如果一个氢原子中的电子占据轨道态 $|3\ -1\rangle$  和自旋态 $|1/2\ 1/2\rangle$ ，那么它的 $l=3$ ， $m_l = -1$ ，...”；

**Page101 Line1:** “赝矢量”应为“赝标量”；

**Page103 Line3:** “右手反中微子”应为“左手反中微子”；

**Page176** 外线Feynman Rule入射正电子 $\bar{\nu}$  出射正电子 $\nu$ ;

**Page249** 第一行文字应为table9.2的注解文字而非正文，“为零”二字多余；

**Page105**，(4.72)式第二行“ $10^{-11}\text{s}$ ”应为“ $10^{-8}\text{s}$ ”

**Page233**，第一行，“而给定若衰变”改为“考虑到弱衰变”；第二行“大概能满足”改为“应该满意”

**Page228**, (9.30)后第一行，“当粒子3和4图像上与粒子2反向时”改为“当粒子3和4与粒子2截然反向时”



谢谢