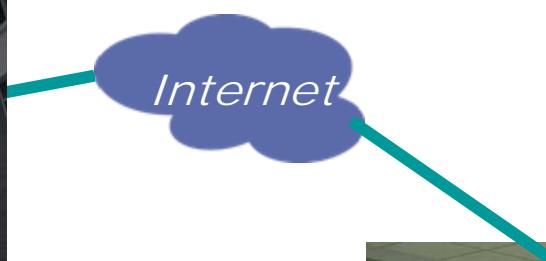
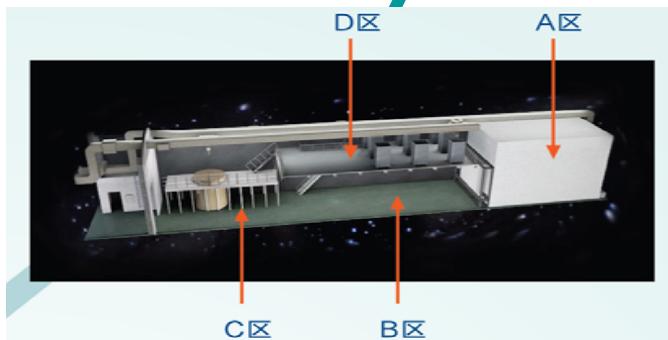


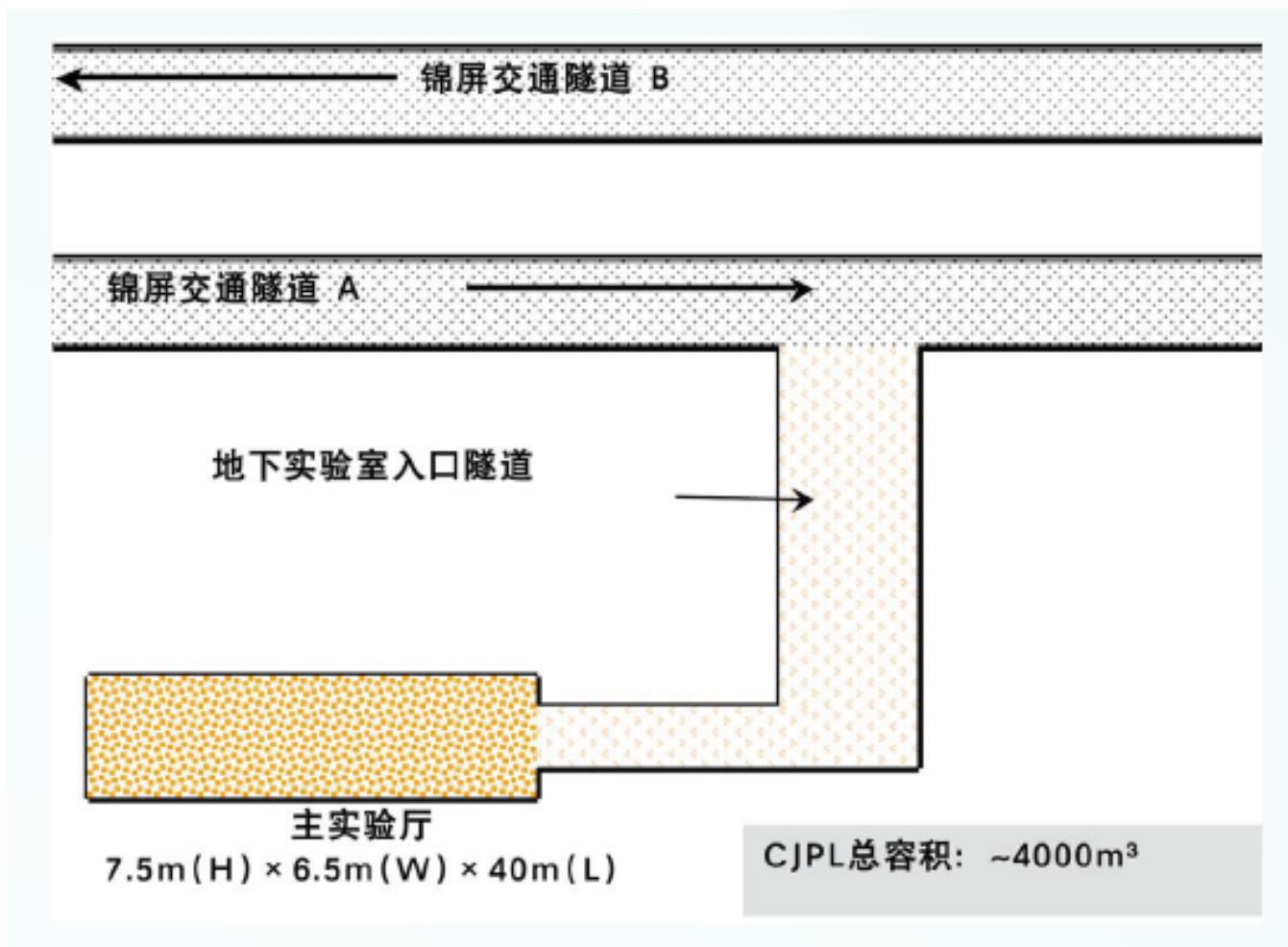
实验室整体布局

- 地下实验室(辅助洞A通道内)
- 洞口实验室(辅助洞监控楼)
- 远端数据中心(清华大学工物系)

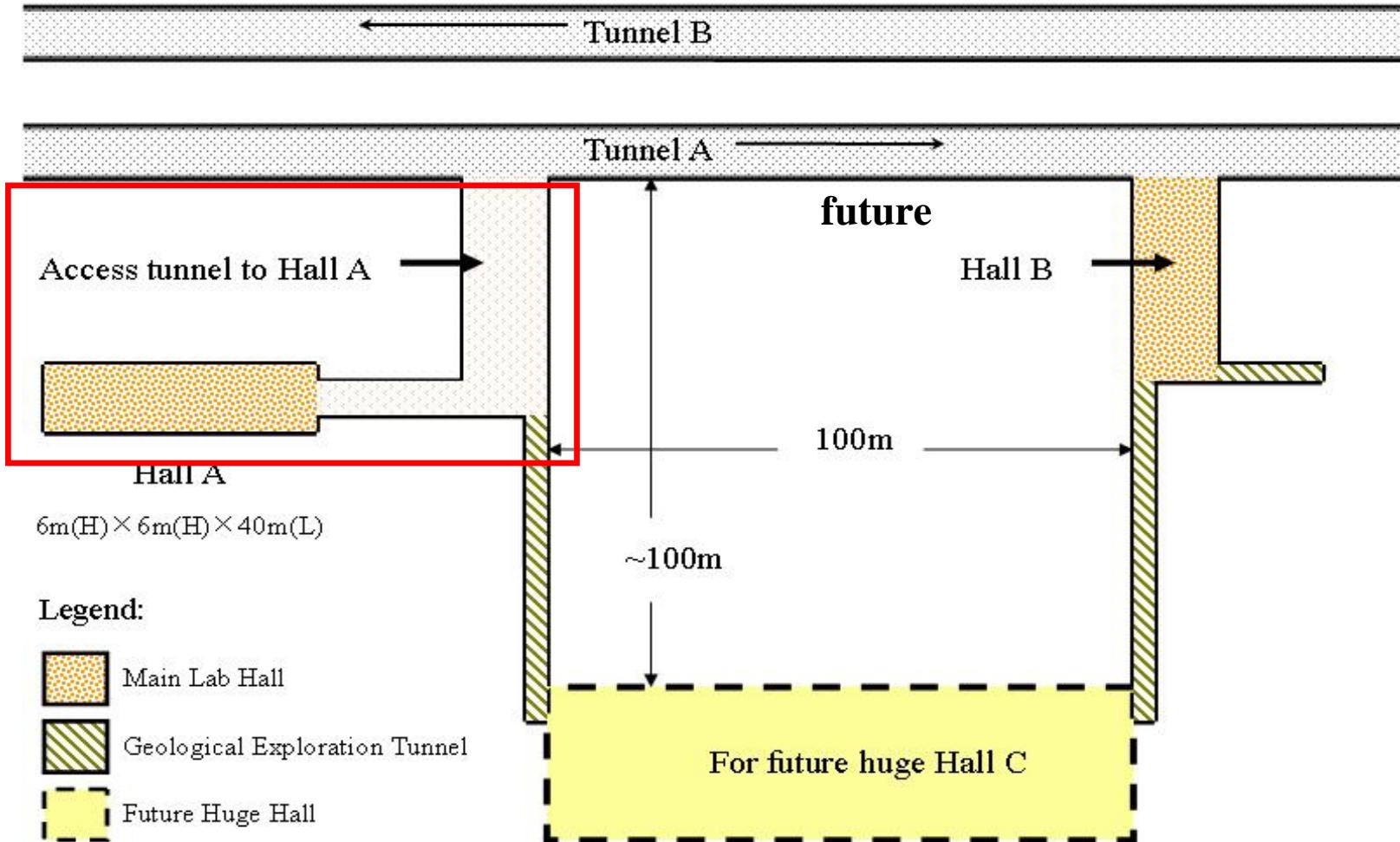


中国科学院理论所冬季
-- 暗物质与重子物质起源

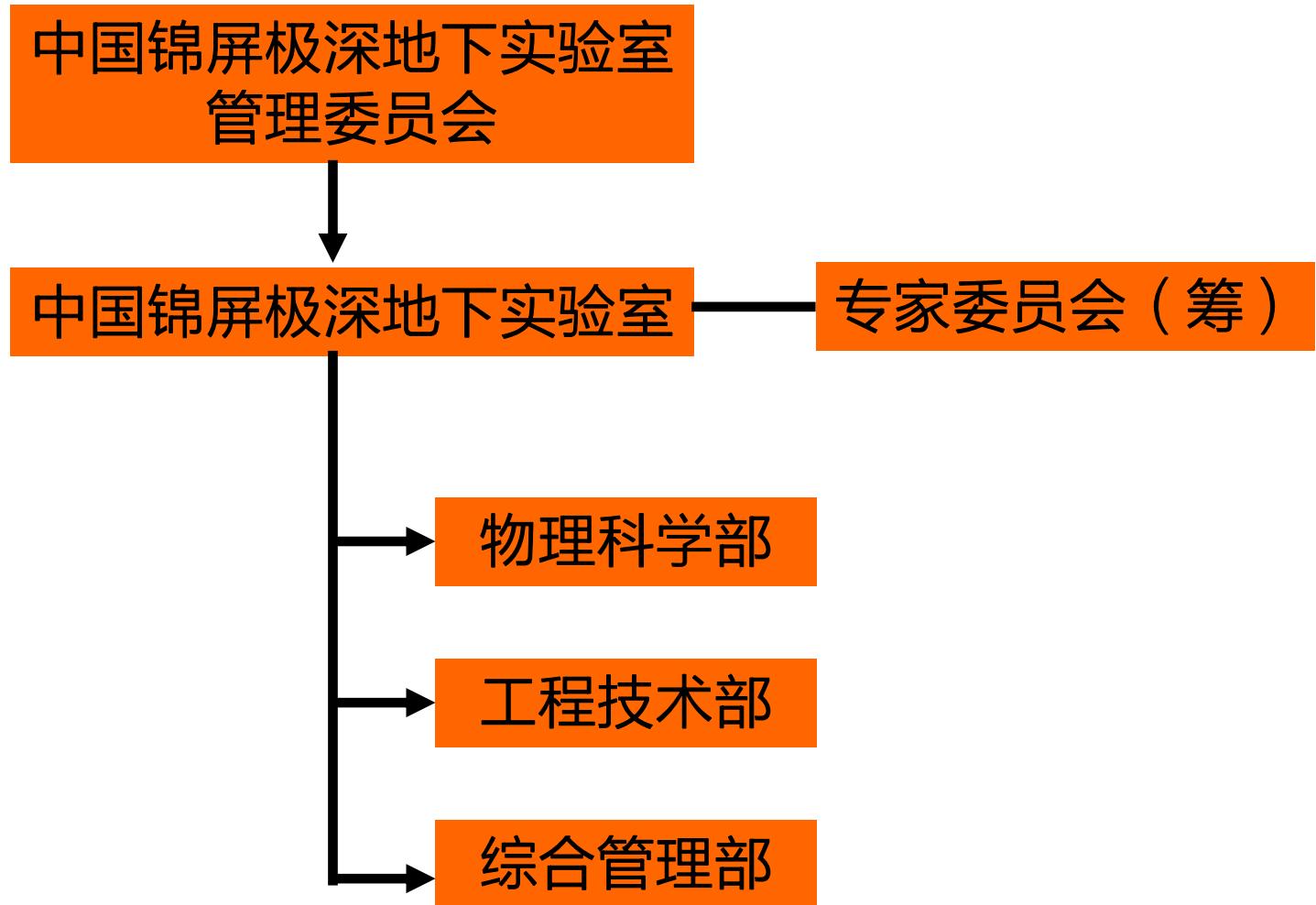
中国锦屏地下实验室实验室平面规划



中国锦屏地下实验室发展规划



中国锦屏地下实验室组织结构图

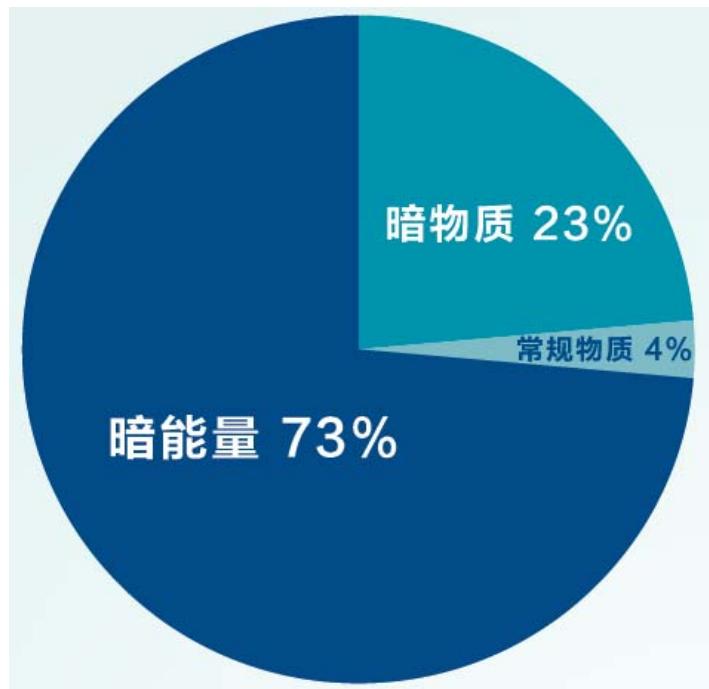


2009年香山科学会议

- 2009年10月25 – 26日S11次香山会议“深地科学重大前沿问题”在北京香山饭店举行。
- 与会专家在广泛交流和深入讨论的基础上，高度肯定了建设锦屏极深地下实验室的重大意义：
 - 建设我国自己的深地实验室，开展深地科学实验是我国国民经济发展的迫切需求，并对提升我国在国际科技相关前沿领域的地位具有重大意义。
 - 锦屏深地隧道，是世界垂直岩石覆盖最深的隧道，具有国际一流的综合条件，为我国深地实验室建设提供了理想的环境与条件。
 - 深地实验室建设符合国家中长期科技发展规划的基础研究规划，是我国相关学科发展的重要机遇。

暗物质研究的重要物理意义

- 暗物质(Dark Matter) 占宇宙物质总质量的约90%。暗物质确定存在，是什么还没有研究清楚。
- 2003年，美国自然科学基金委、能源部的一份有众多物理学家参与的研究报告提出《21世纪的11个基本科学问题》中，“什么是暗物质？”位列第一。
- 中国科学院战略研究系列报告《创新2050：科学技术与中国的未来》（2009）提出：暗物质是不远的未来可能出现革命性突破的重大基本科学课题。
- 暗物质探测研究已经成为当前粒子物理学,天体物理学和宇宙学等研究领域的重大前沿课题，是21世纪物理学发展中的几个关键性难题之一。



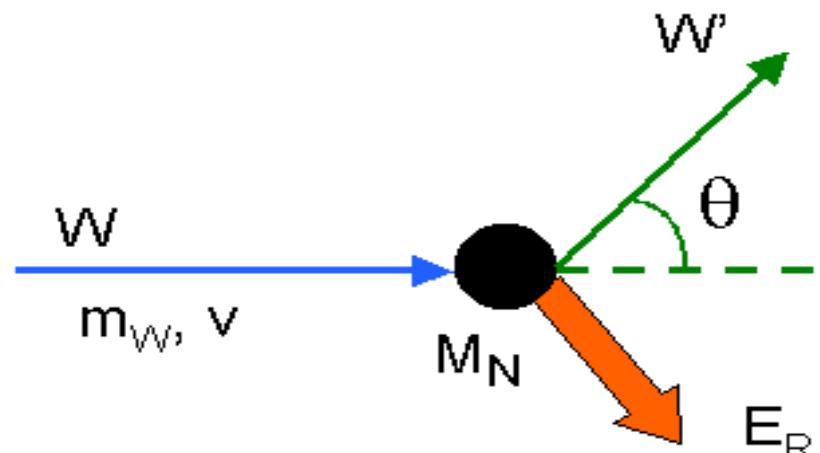
暗物质粒子的候选者



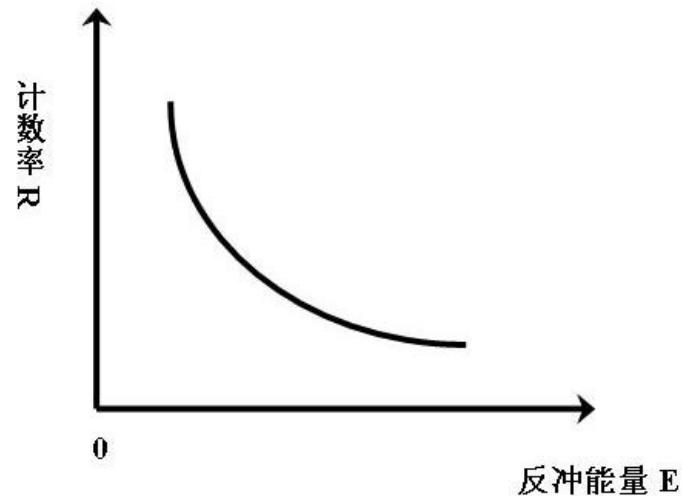
暗物质是什么？根据当前暗物质理论，有很多暗物质候选粒子，其中最可能的暗物质候选者就是WIMP。

暗物质WIMP直接探测实验的原理

测量弹性散射后的
反冲核能量 E_R



反冲核能谱按指数分布
能量越高，事例率越低



$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{R_0}{E_0 r} e^{-E_R/E_0 r}$$

特点：极低本底
低能量阈

国际上几个代表性实验及结果

CRESST: Al_2O_3 262g
(法) 低温量热技术

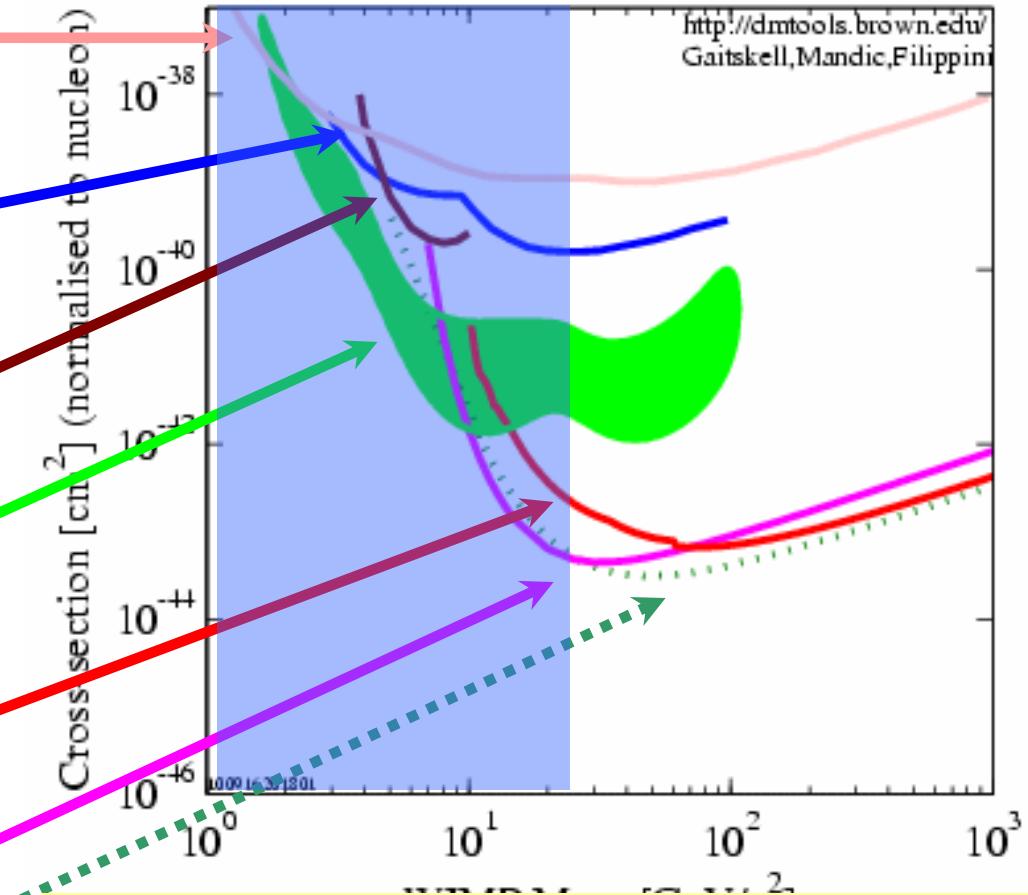
CDEX/TEXONO: 2009
ULE-HPGe Detector
Array (中) 测量电离

CoGeNT: 2008年
PCGe Detector
(美) 测量电离

DAMA: NaI晶体~200kg
(意) 2008年 闪烁光

CDMS: 极低温Ge探测器
(美) 250g \times 7 2009年
电离及低温量热

XENON10: 液态氙 10kg
(美) 电离及闪烁光
XENON100:
100kg LXe 2010年



可以看到：在低质量区探测灵敏度较差。近年来低质量区间的实验研究成为了新的研究热点。

国际暗物质实验研究现状分析

- ◆ 2009年CDEX实验组利用低阈值高纯锗探测器在地面实验室复合屏蔽体中测量得到了首个暗物质实验结果，在 10GeV 以下的低质量区得到了世界上最好的灵敏度。（*Physical Review D, 061101R*）
- ◆ 2009年10月美国CDMS实验组发表了新的暗物质研究成果，在低能量区间测量到两个可能的暗物质事例，在暗物质研究领域引起了热烈的讨论。CDMS计划进一步降低探测器能量阈值来探测和研究暗物质。
- ◆ 2010年2月，美国CoGeNT实验组利用能量阈值约为 $300\text{--}400\text{eV}$ ，质量为 475g 的PCGe探测器，测量得到新的低质量区灵敏度曲线，并同时给出了暗物质可能存在的区域： 10GeV 附近。

XENON100 最新实验结果

PRL 105, 131302 (2010)

Selected for a Viewpoint in Physics
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
24 SEPTEMBER 2011



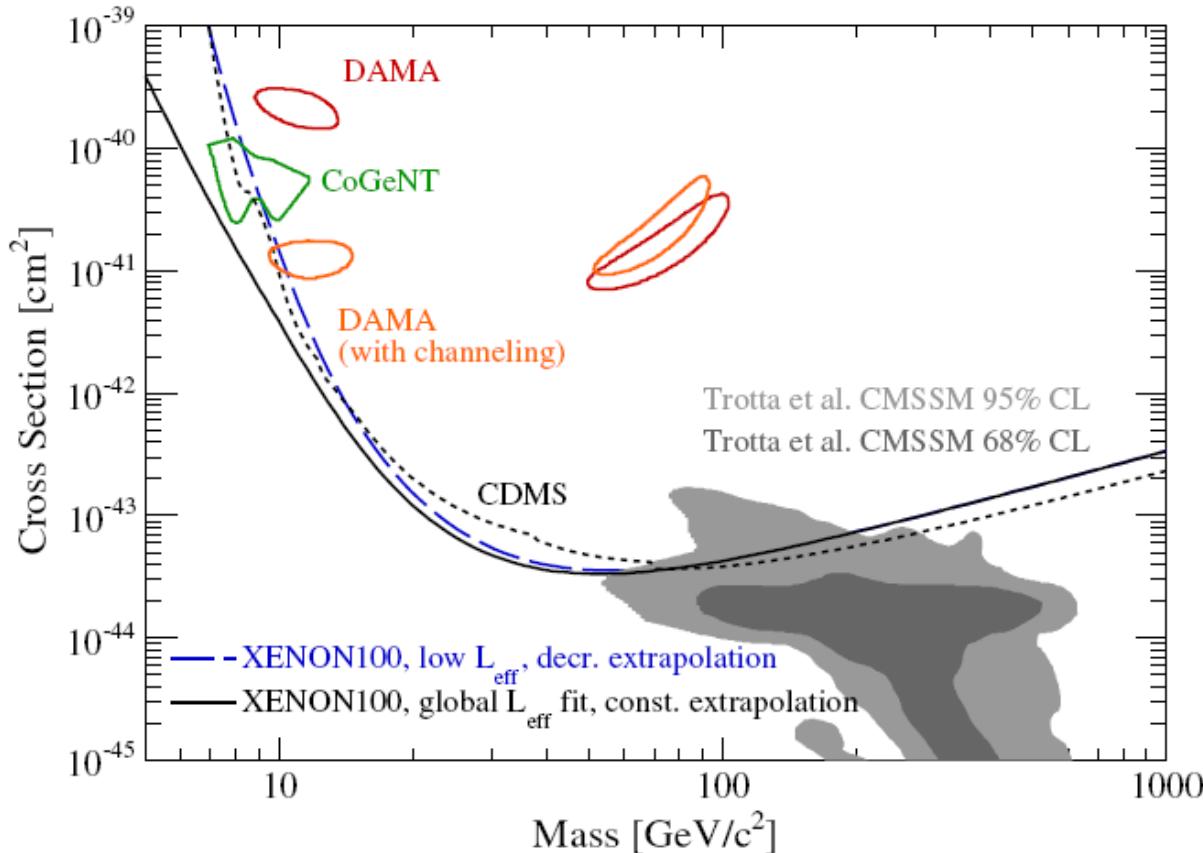
First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment

E. Aprile,¹ K. Arisaka,² F. Arneodo,³ A. Askin,⁴ L. Baudis,⁴ A. Behrens,⁴ K. Bokeloh,⁶ E. Brown,² J. M. R. Cardoso,⁵ B. Choi,¹ D. B. Cline,² S. Fattori,³ A. D. Ferella,⁴ K.-L. Giboni,¹ A. Kish,⁴ C. W. Lam,² T. Lamblin,⁷ R. F. Lang,¹

K. E. I

S. E. A. C

Oberlack,⁸,
^{4,8} P. Shagin.



地下实验室

C

CDMS 旧数据新分析

A low-threshold analysis of CDMS shallow-site data

D.S. Akerib,³ M.J. Attisha,¹ L. Baudis,²⁰ D.A. Bauer,⁴ A.I. Bolozdynya,^{3, a} P.L. Brink,¹⁰ R. Bunker,^{16, b}
B. Cabrera,¹² D.O. Caldwell,¹⁶ C.L. Chang,^{12, c} R.M. Clarke,¹² J. Cooley,¹¹ M.B. Crisler,⁴
P. Cushman,¹⁹ F. DeJongh,⁴ R. Dixon,⁴ D.D. Driscoll,^{3, d} J. Filippini,² S. Funkhouser,¹⁵ R.J. Gaitskell,¹
S.R. Golwala,² D. Holmgren,⁴ L. Hsu,⁴ M.E. Huber,¹⁷ S. Kamat,³ R. Mahapatra,¹⁴ V. Mandic,¹⁹
P. Meunier,¹⁵ N. Mirabolfathi,¹⁵ D. Moore,² S.W. Nam,^{12, e} H. Nelson,¹⁶ R.W. Ogburn,¹²
X. Qiu,^{19, f} W. Rau,⁸ A. Reisetter,^{19, 6} T. Saab,¹⁸ B. Sadoulet,^{5, 15} J. Sander,¹⁴ C. Savage,^{16, g}
R.W. Schnee,¹³ D.N. Seitz,¹⁵ T.A. Shutt,^{7, h} G. Wang,^{3, i} S. Yellin,^{12, 16} J. Yoo,⁴ and B.A. Young⁹

(CDMS Collaboration)

¹Department of Physics, Brown University, Providence, RI 02912, USA

²Division of Physics, Mathematics & Astronomy,

California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

³Department of Physics, Case Western Reserve University, Cleveland, OH 44106, USA

⁴Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL 60510, USA

⁵Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

⁶Department of Physics, St. Olaf College, Northfield, MN 55057 USA

⁷Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

⁸Department of Physics, Queen's University, Kingston, ON, Canada, K7L 3N6

⁹Department of Physics, Santa Clara University, Santa Clara, CA 95053, USA

近期国际暗物质实验结果总结

- ✓ 越来越多实验结果表明低质量区可能存在暗物质，国际暗物质研究的质量区间向低能区方向转移。
- ✓ 一些在几十GeV的较高质量区开展研究的实验，也正在将其能量阈值进一步降低，以便可以开展低质量区间的暗物质测量工作。
- ✓ 暗物质低质量区竞争加剧，我们需要加快步伐，继续保持我国暗物质实验在这个区间的领先地位。

国际暗物质实验技术的发展

- 暗物质实验技术的两个发展方向：

- ◆ 提高探测效率

- 增大探测器靶质量
 - 降低探测器能量阈

- ◆ 降低本底

- 屏蔽宇宙射线
 - 采用铅、铜、聚乙烯等被动屏蔽系统
 - 采用闪烁体等主动屏蔽系统
 - 发展高效信号甄别方法

近期锦屏地下实验室计划的实验项目

- ✓ CDEX实验计划，极低能量阈高纯锗阵列探测器。合作研究单位：清华大学、四川大学、中国原子能科学研究院、南开大学、二滩水电开发有限责任公司。
- ✓ PandaX实验计划，液氙探测器。合作研究单位：上海交通大学、上海应用物理研究所、山东大学。

高纯锗探测器用于暗物质测量的优势

- ✓ 高纯锗探测器在提高探测效率方面：
 - 能量阈值低（200 – 300eV），探测灵敏度高
 - 模块化设计可以在低阈值的同时提高探测器靶质量
- ✓ 高纯锗探测器在降低本底方面：
 - 自身放射性纯度高， ^{12}N - ^{13}N ，本底低。
 - 探测器密度较高，体积相对小，易屏蔽。
 - 具有脉冲波形甄别能力，可进一步降低本底。

CDEX实验介绍

- ✓ 实验地点：中国锦屏地下实验室
- ✓ 探测系统：
 - 国际上纯度最高的高纯锗晶体材料；
 - 单体质量为1kg，模块化，1000个探测单元；
 - 点接触高纯锗探测器单元，能量阈值小于300eV；
 - 液氩、铜、铅、聚乙烯等构成的复合屏蔽体；
- ✓ 研究团队：
 - 清华大学
 - 四川大学
 - 中国原子能科学研究院
 - 南开大学
 - 二滩水电开发有限责任公司
- ✓ 海外合作团队：
 - 台湾中研院
 - 台湾新竹清华大学
 - 韩国首尔大学
 - 韩国庆北京大学

CDEX历史

第 28 卷 第 8 期
2004 年 8 月

高能物理与核物理
HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS

Vol. 28, No. 8
Aug., 2004

Detection of WIMPs Using Low Threshold HPGe Detector

YUE Qian^{1;1)} CHENG Jian-Ping¹ LI Yuan-Jing¹ LI Jin^{1,2} WANG Zi-Jing³

1(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

2003年完成第一篇低能量阈高纯锗探测器直接探测暗物质的研究文章，启动清华大学自主高纯锗探测器测量暗物质实验计划。

Abstract An HPGe detector with low energy threshold and high-purity germanium has been explored based on the possibility to provide

). The su-
g mass has
it will be
ass region.

PHYSICAL REVIEW D 79, 061101(R) (2009)

New limits on spin-independent and spin-dependent couplings of low-mass WIMP dark matter with a germanium detector at a threshold of 220 eV

S. T. Lin,¹ H. B. Li,¹ X. Li,² S. K. Lin,¹ H. T. Wong,^{1,*} M. Deniz,^{1,3} B. B. Fang,² D. He,² J. Li,^{2,4} C. W. Lin,¹ F. K. Lin,¹ X. C. Ruan,⁵ V. Singh,^{1,6} A. K. Soma,^{1,6} J. J. Wang,¹ Y. R. Wang,¹ S. C. Wu,¹ Q. Yue,² and Z. Y. Zhou⁵

2009年发表第一篇利用低能量阈高纯锗探测器探测暗物质粒子的研究论文。（国际著名Physical Review D杂志）

³Department of Physics, Middle East Technical University, Ankara 06531, Turkey

⁴Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

⁵Department of Nuclear Physics, Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

⁶Department of Physics, Banaras Hindu University, Varanasi 221005, India

(Received 10 December 2007; revised manuscript received 22 May 2008; published 12 March 2009)

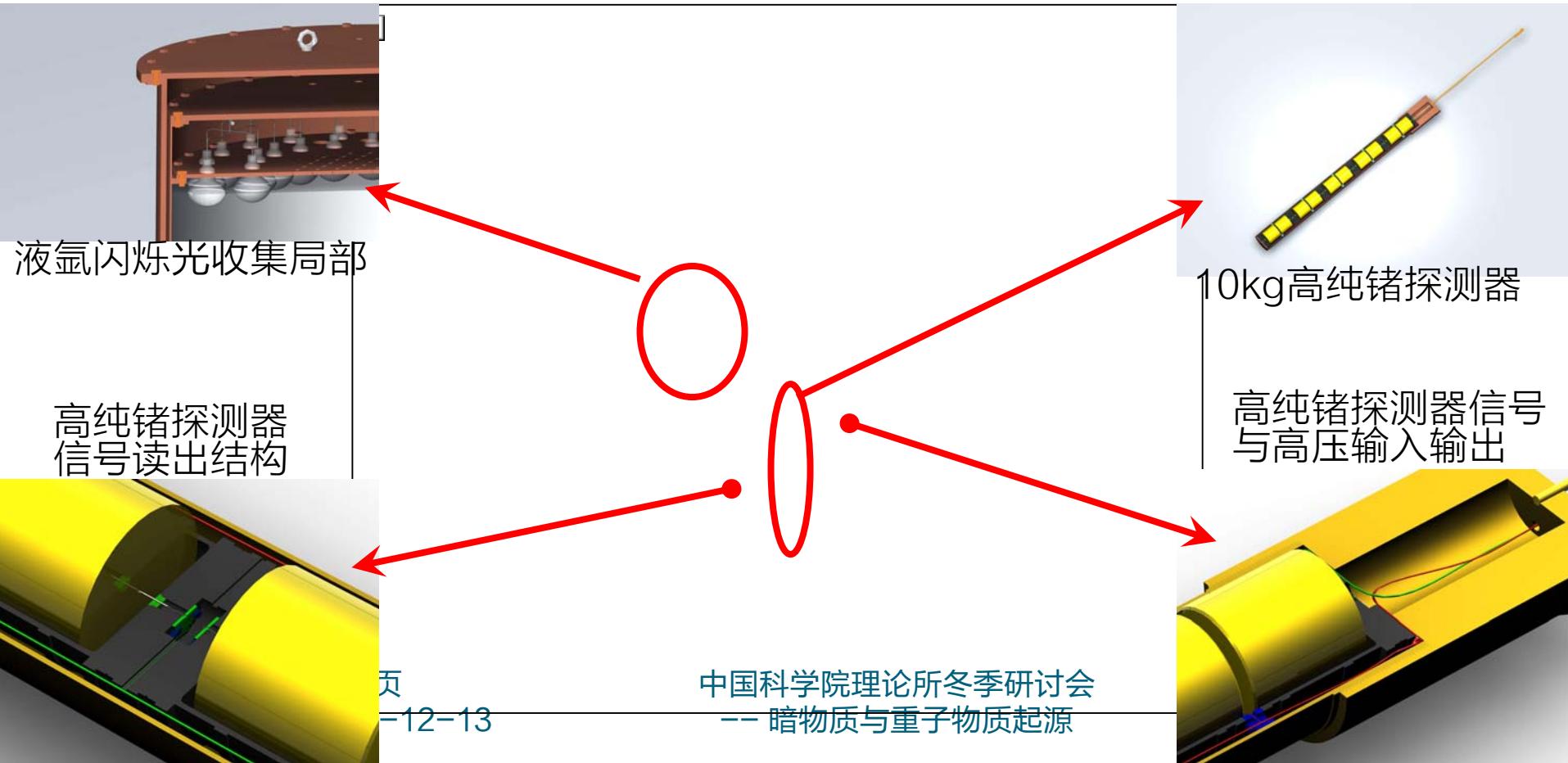
CDEX实验复合屏蔽系统

- ✓ 在中国锦屏地下实验室，利用厚达2400m的巨大山体，将宇宙线通量降到地面水平的千万分之一到亿分之一，极大降低宇宙线的影响，提供“干净”的实验环境；
- ✓ 1m厚的聚乙烯将岩石产生的中子降低到原来的亿分之一以下；
- ✓ 20cm铅、20cm含硼聚乙烯和10cm高纯无氧铜降低外部伽马射线、中子对探测器的本底贡献；
- ✓ 除氢技术降低空气中放射性氢气对暗物质探测器的本底贡献；
- ✓ 利用液氩反符合系统，进一步降低环境、铅、铜以及探测器自身的放射性本底。



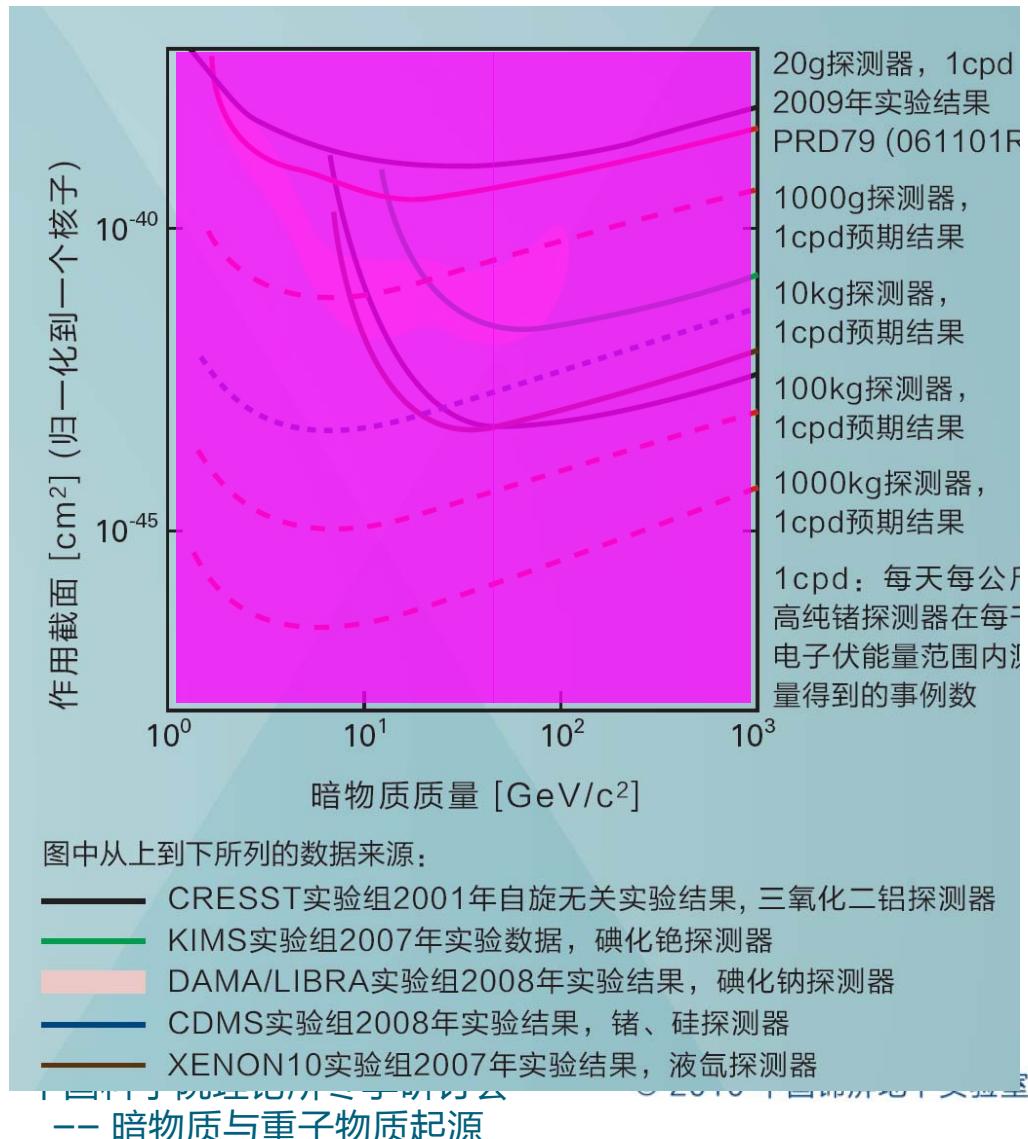
CDEX实验探测器系统

- ✓ 10个1kg高纯锗探测器单元模块构成一个探测器真空封装结构；
- ✓ 将其浸泡在液氩中，液氩不仅作为低温介质，还是反符合探测器系统；
- ✓ 液氩中的闪烁光通过低温低本底大口径光电倍增管读出；



CDEX项目组物理目标

- ✓ 在质量为 10GeV 范围内得到 10^{-46}cm^2 以下的国际最好暗物质探测灵敏度；还可以覆盖几十 GeV 以上的大质量区。
- ✓ 取得具有突破性的暗物质探测灵敏度测量结果，测量到暗物质的存在和分布范围；
- ✓ 或者没有测量到暗物质，但大范围排除理论预期的暗物质空间，对当前暗物质理论进行重大检验。



CDEX项目发展路线图

- ✓ 2000年，清华大学参与国际合作，开展暗物质研究工作；
- ✓ 2003年，清华大学开展自主理论分析研究，确定利用极低能量阈高纯锗探测器自主开展暗物质直接探测实验的技术路线；
- ✓ 2005年，开展1kg级低能量阈高纯锗探测器性能研究；
- ✓ 2009年，项目组在Physical Review D发表第一个暗物质实验结果，在10GeV以下能区得到国际最灵敏的暗物质测量结果；
- ✓ 2009年，清华大学与二滩水电开发有限责任公司开展战略合作，共同建设中国锦屏地下实验室；
- ✓ 2010年, CDEX合作组率先在CJPL开展暗物质实验研究；
- ✓ 2010年，自主建设液氩反符合系统，利用定制的10kg级高纯锗阵列探测器开展暗物质实验；同时开展自主高纯锗探测器制作工艺研究；
- ✓ 2015年起，自主掌握高纯锗探测器研制工艺，利用自主研制的吨量级高纯锗阵列探测器开展暗物质探测实验。

CDEX实验关键科学技术问题

- ✓ 暗物质物理研究，特别是低质量区间的暗物质物理问题，是近年来研究热点区域，是本研究项目需要研究的关键问题。
- ✓ 高纯锗探测技术和工艺的研究是本项目的核心技术问题。
- ✓ 反符合探测器的研制也是关系到本项目未来能否发展到较大规模的一项关键技术问题。

CDEX研究进展

- ✓ 开展了地下实验室重要参数测量，为暗物质实验提供关键参数。
 - 宇宙线通量测量
 - 中子本底测量
 - 伽马本底测量
 - 氦气含量测量
 - 超低放射性核素测量平台的建立
- ✓ 1kg级高纯锗测量暗物质的实验研究正在CJPL中开展。
- ✓ 已经开始研究10kg高纯锗探测器测量暗物质的关键物理和技术问题，为开展未来吨量级高纯锗测量暗物质实验奠定技术基础。

高纯锗探测器实验室

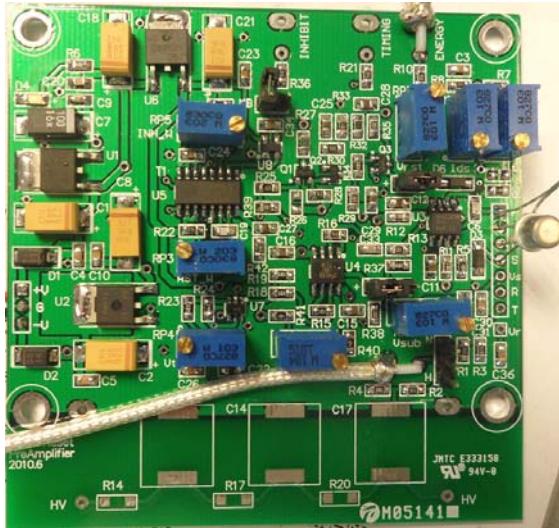


电子学低温测试平台

高纯锗晶体样品及化学蚀刻



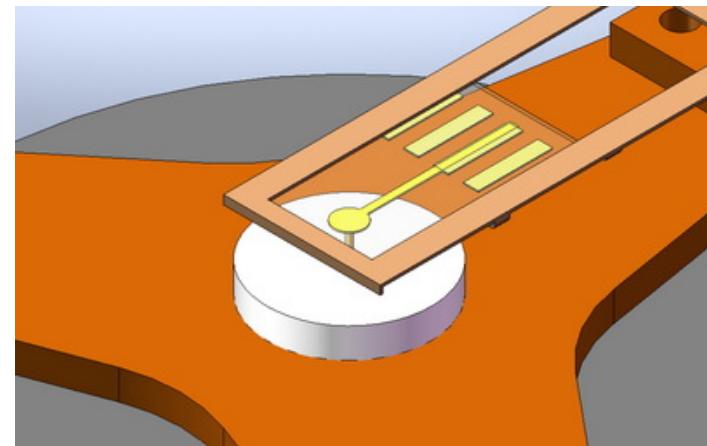
超低噪声电子学前放研制



前放电子学



JFET裸芯架

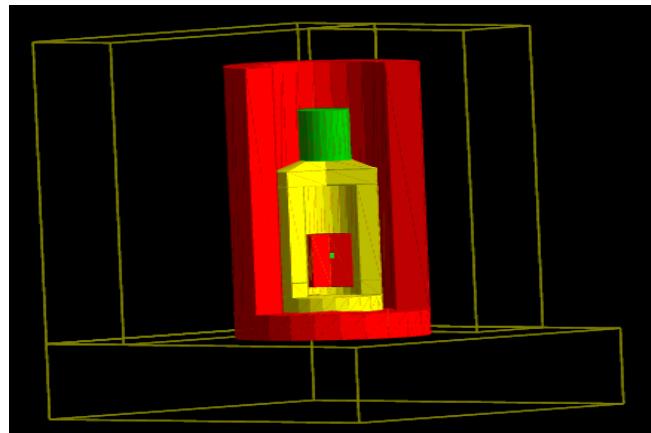


点电极晶体信号引出结构示意图

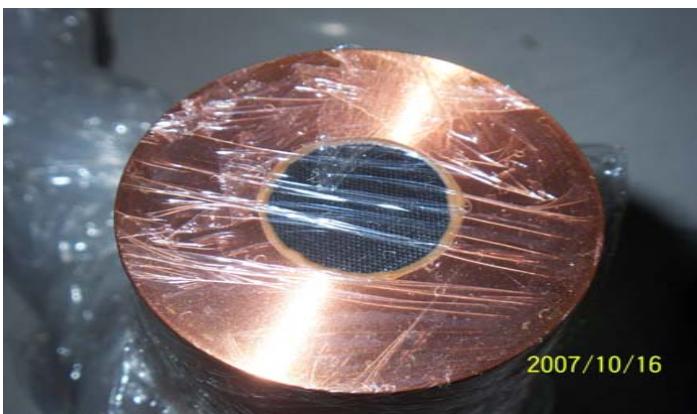
多年的高纯锗探测器实验经验



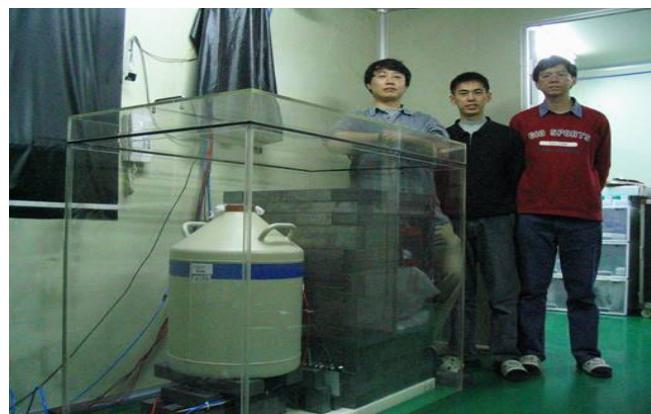
正在安装的探测器



探测器结构模拟图



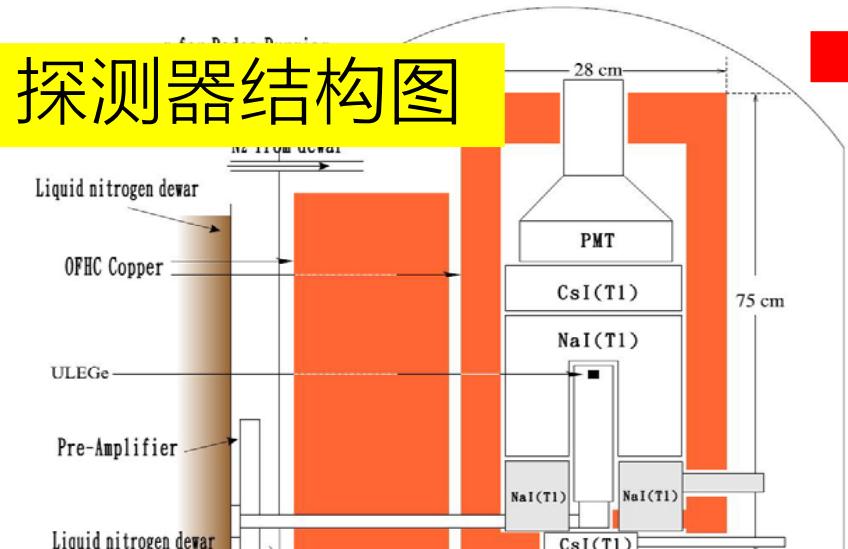
探头部分细节 - 炭窗



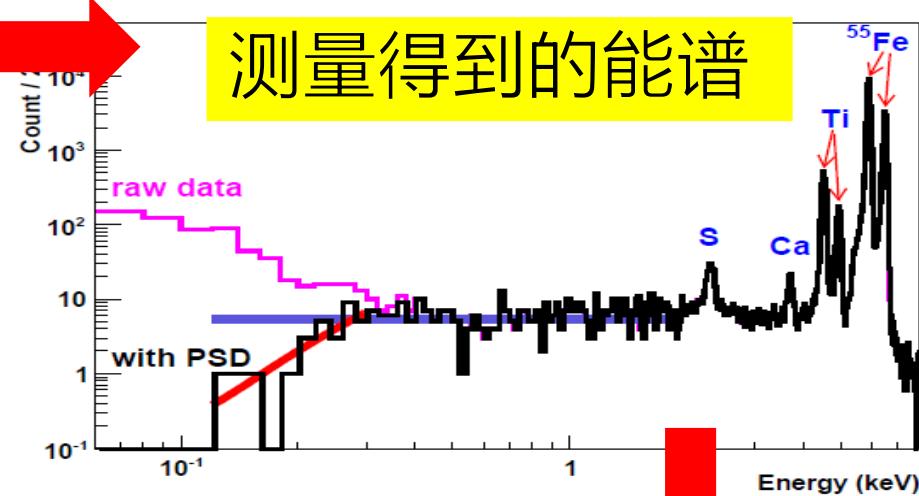
探测器系统及实验人员

数据处理和分析方法已建立

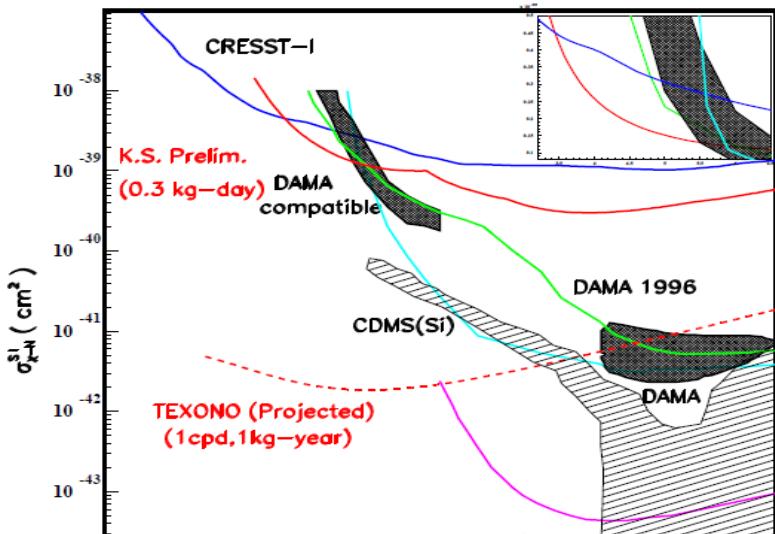
探测器结构图



测量得到的能谱



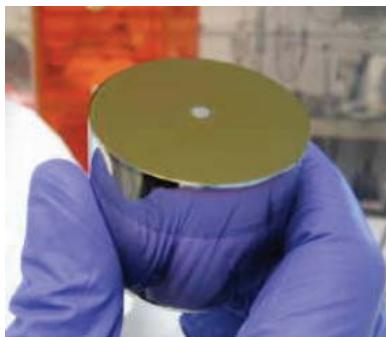
脉冲波形甄别



实验结果文章: PRD(79)061101,2009

高纯锗探测器单元设计

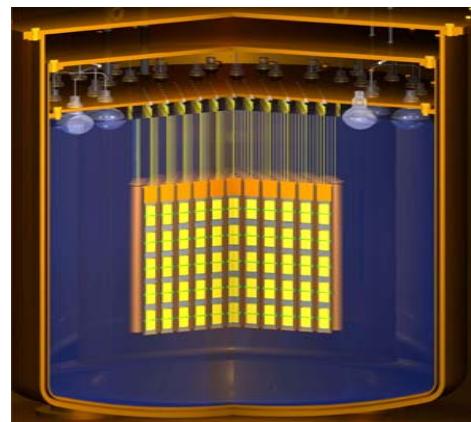
- ✓ 质量为1kg的P型点接触高纯锗探测器，每10个探测器组成一个真空密封模块。
- ✓ 将这种高纯锗探测器模块组成阵列，浸泡在液氩反符合探测器的介质中工作。



高纯锗探测器晶体单元



由10个探测器组成一个模块。内部真空，外壳为高纯材料



多个模块排放在一起组成高纯锗探测器阵列，浸在液氩反符合探测器中

暗物质实验已经开始

20gHPGe探测器测试和运行、1kgHPGe下月开始测试



本项目特色及创新

- 研究工作切入点有创新：本项目主要采用极低能量阈高纯锗阵列探测器，探测和研究质量小于 10GeV 的低能量区间暗物质粒子，是国际暗物质研究热点领域。
- 探测手段有特色：以低能量阈高纯锗阵列探测器为探测工具，开展相关物理问题、以及探测器技术、低温技术、屏蔽技术，电子学等方面的关键技术研究，实现吨量级暗物质直接探测实验的研究目标
- 前沿基础研究和先进探测技术研发有机结合：将暗物质研究与自主研制高纯锗探测器结合起来，极大推动自主暗物质项目的研究以及先进探测器的研究，为未来吨量级的暗物质探测研究奠定技术基础。

总 结（一）

- ✓ 暗物质研究是基础物理前沿课题，孕育重大突破，各国研究热点。
- ✓ 经过近十年的研究，CDEX项目组具备了良好的暗物质实验经验，建立了研究队伍，掌握了很好的实验技术。
- ✓ CDEX项目组2003年启动的高纯锗探测器测量暗物质的实验方案得到了国际社会的广泛认可，是非常具有竞争力的实验方案。
- ✓ 在自然科学基金委员会、教育部、清华大学、四川大学等单位的大力支持下，项目组将首先在10GeV以下能区开展暗物质实验研究，期望尽快取得我国自主暗物质测量结果。

总 结 (二)

- ✓ 清华大学与二滩水电开发有限责任公司联合建设的中国锦屏极深地下实验室（CJPL）已经建成，重要实验室参数测量工作正在展开，为中国暗物质直接探测实验的发展提供了国际一流的实验室条件。
- ✓ 中国暗物质直接探测实验组（CDEX）已经启动10kg级高纯锗阵列探测器的相关物理和关键技术问题研究，希望能够在世界上第一个建成10kg量级的极低能量阈高纯锗阵列探测器系统，取得国际一流的暗物质实验结果，为顺利开展吨量级暗物质实验奠定基础。

总 结 (三)

- ✓ 国际高纯锗探测器技术由奥泰克和堪培拉两家公司垄断，价格昂贵，我国各行业每年大量采购高纯锗探测器。
- ✓ 国际上基础研究不同领域的吨量级高纯锗探测器实验有多家，对于高纯锗晶体和探测器需求非常大。高纯锗探测器的价格也是开展这些实验研究的重要制约因素。
- ✓ 为了配合暗物质实验研究工作，清华大学开展了高纯锗探测器的自主研制，目前进展顺利。
- ✓ 我国是锗储量最大国家，主要提供低纯度锗材料和锗晶体。没有高端产业拉动，无法产业升级。开展高纯锗探测器的自主创新研究非常重要，可以提升我国高端产业竞争力，也能够促进暗物质等重大基础前沿科学的研究。

谢谢！



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