

# 地下实验室与暗物质探测

- 地下实验室引言;
- 锦屏山地点概况;
- 国家深地实验室规划;
- 暗物质探测

杨长根

2010/4/17, 南昌

# 地下实验室引言

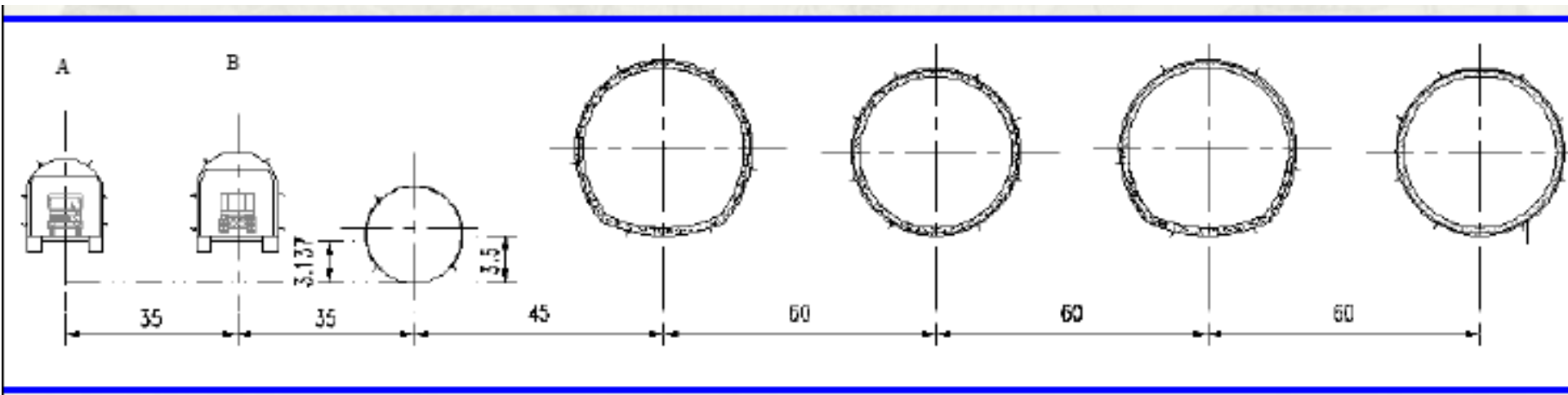
- 多年以来，为着不同的科学目的，科研人员不断的尝试寻找合适的地下实验场所；
- 中科院岩土力学研究所率先与二滩水电开发有限责任公司合作，在锦屏山开始深地实验研究；
- 清华大学在锦屏山正在建设较小规模的地下实验室；
- 科学院五所合作希望进一步推进地下实验室的建设。



# 锦屏辅助交通隧洞

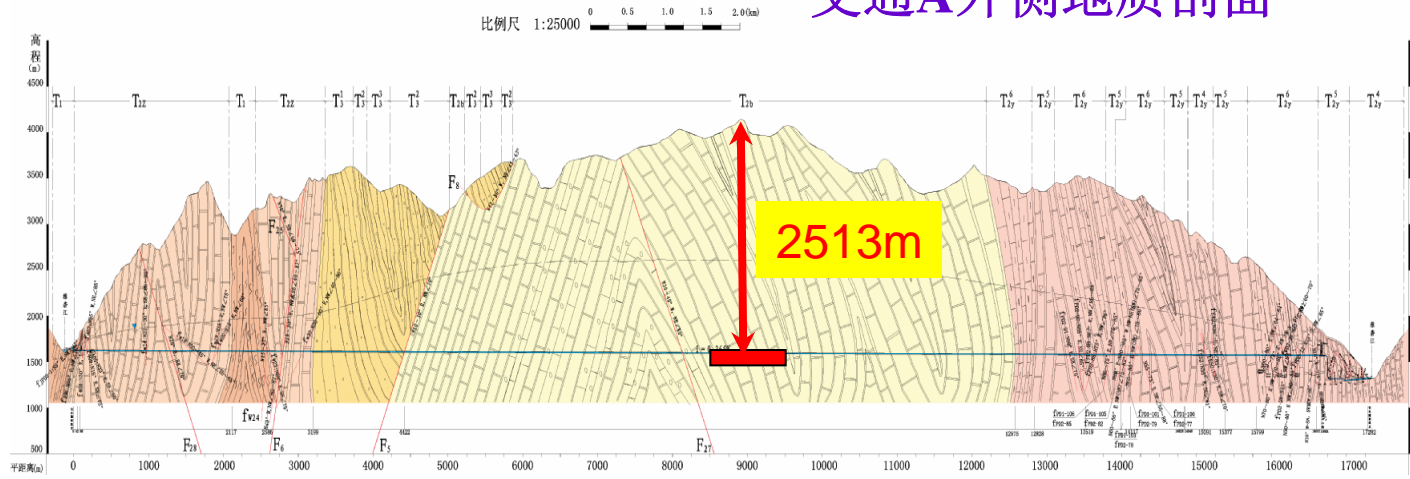
锦屏辅助交通隧洞的设置，不仅解决了锦屏水电站对外交通和运行管理问题，也为锦屏二级水电站引水隧洞的地质勘探和科研试验提供了条件。锦屏极深地下实验室将建设在A洞中部。

辅助洞、施工排水洞及引水隧洞关系图





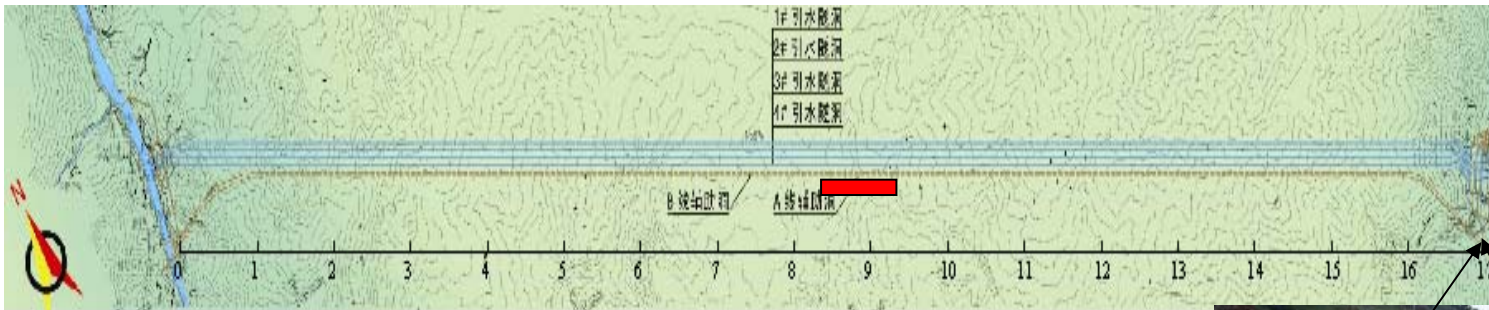
# 交通A外侧地质剖面



## 图例

	细砂岩		条带状云母大理岩
	中砂岩		大理岩
	粗砂岩		绿泥片岩
	板岩		断层及其编号
	角砾状大理岩		T <sub>n</sub> 地层时代
	结晶灰岩		推测地下水位线
	泥质灰岩		建筑物轮廓线

说明：  
 1. 本剖面地形线系根据1:25000地形图切制。  
 2. 雅砻江坐标系；1956年黄海高程系。



**深地实验室位置**

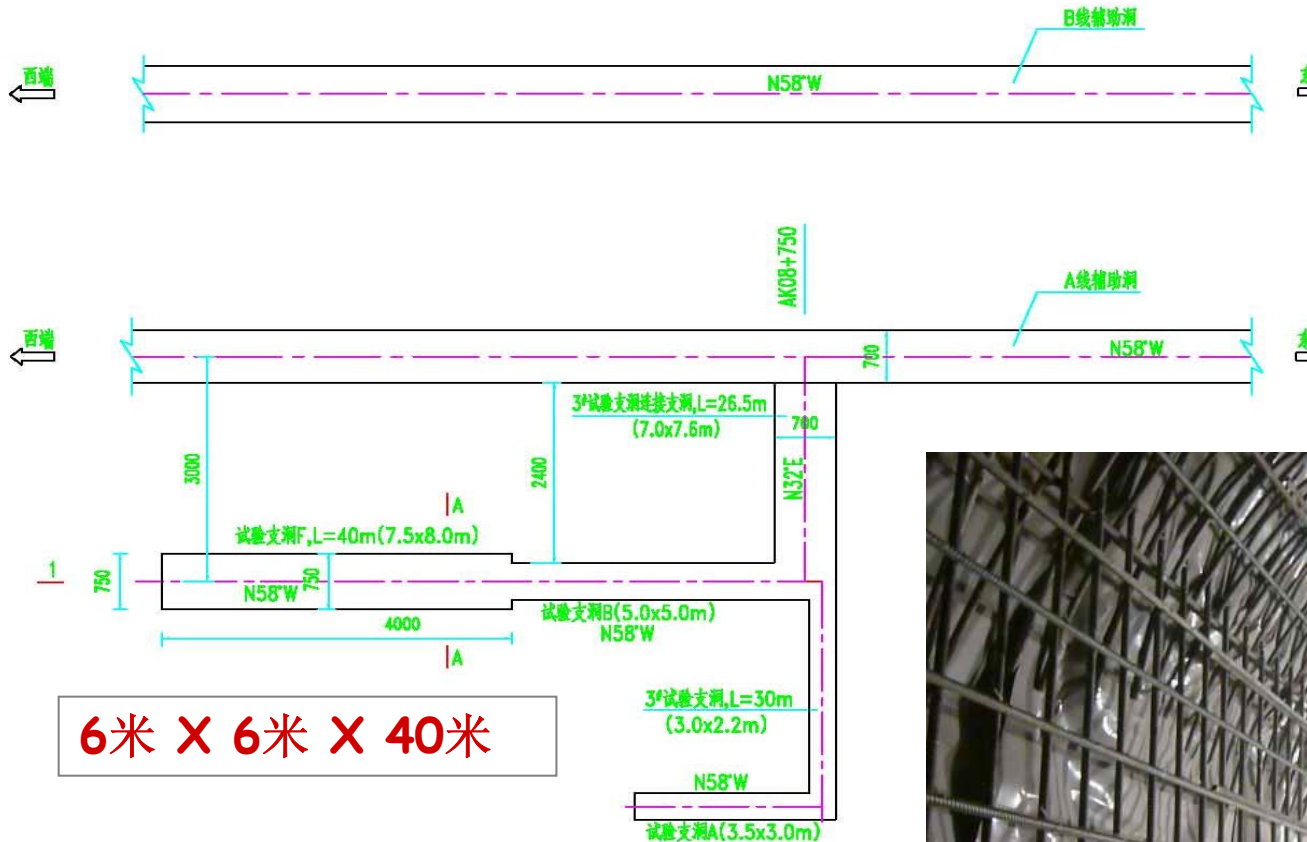


# 西昌—锦屏，I级公路，1.5小时





# The layout of CJPL (清华大学)



**6米 X 6米 X 40米**

辅助洞新增试验支洞F、G平面布置图

1:500



# 中国暗物质探测实验

## China Darkmatter EXperiment (CDEX)

清华大学, THU

四川大学, SCU

中国原子能科学研究院, CIAE

南开大学, NKU

二滩水电开发有限公司, EHDC

**TEXONO**

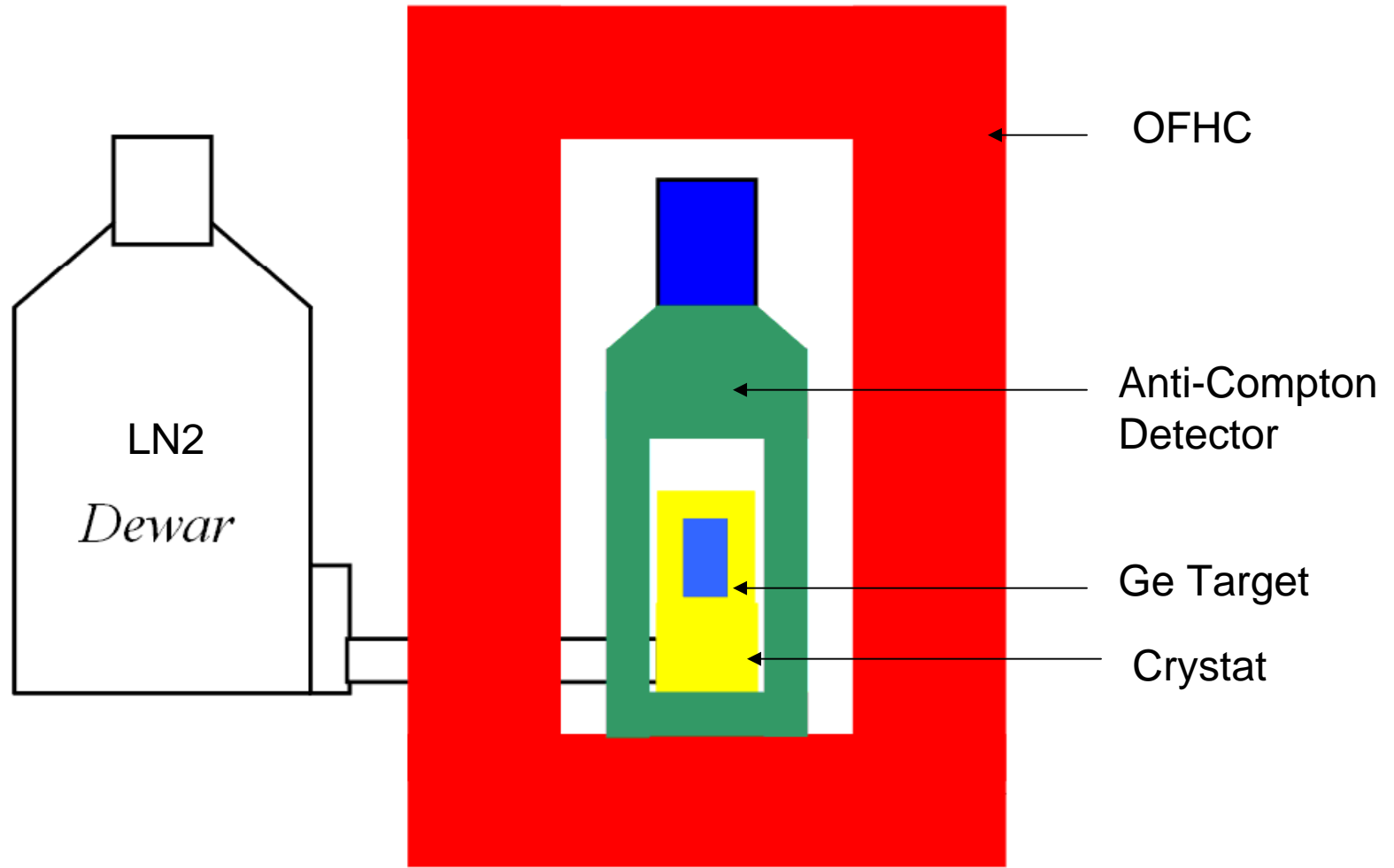
中研院物理所, AS

**KIMS**

首尔大学, SNU

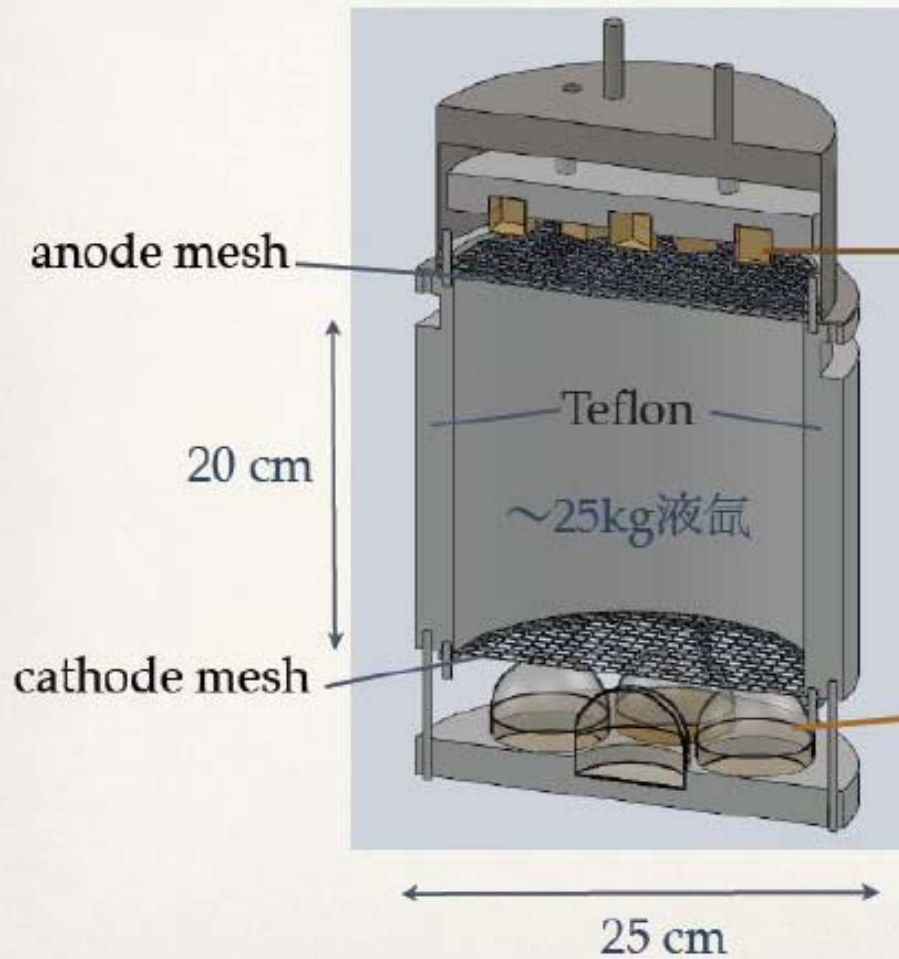


# Detector and Shielding



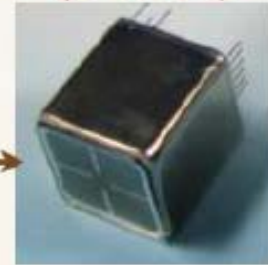
# XENON1t R&D (上海交大)

CXO25探测器内部漂移室细节介绍



顶部：20 R8520  
(973经费购买)

(1" x 1")



底部：7个QUPID  
(3" diameter)

# 科学院五所合作希望进一步推进 地下实验室的建设

武汉岩土力学研究所，  
高能物理研究所，  
近代物理研究所，  
测量与地球物理所，  
武汉物理与数学研究所

# 深地实验室建设的科学意义

## • 地下的科学和工程实验室DUSEL建设建议

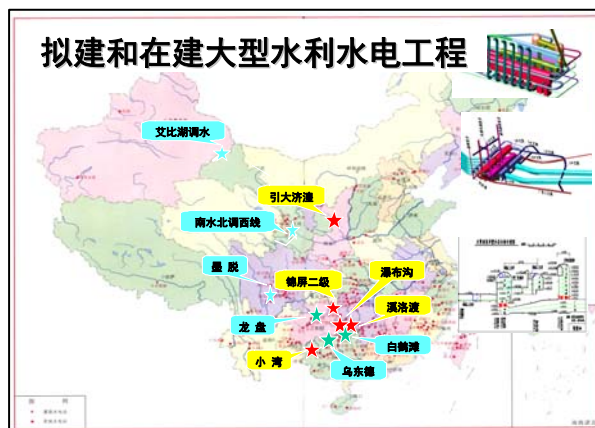
“深部地下实验室不仅可以

将粒子物理、天体物理、生命科学、地球科学和工程学等学科研究前沿推向新的高度，还将极大地促进这些学科的相互融合。深部科学计划将为人们对赖以生存的星球、星球上栖息的生命、星球所归属的宇宙提供全新的认识；将为基础科学的发展提供前所未有的机遇，为这些技术应用到国防安全和促进国民经济的繁荣贡献新的力量。另外，深部科学计划还将在保证一个国家的基础应用科学在国际上占据领导地位的同时，教育、培养和鼓舞下一代的科学家和工程师。”



# 武汉岩土力学所

深地实验室是解决深部工程与环境安全关键难题的必要途径



**金属矿山：**未来10至15年，400座转入深部开采 (>1000m)，深度延伸8-16 m/年，探矿深度2000-4000m

**水利水电：**数百km深埋超长隧洞。锦屏II级：7条隧洞总长185km，最大埋深2525m；墨脱水电站：单洞长20km，最大埋深3000m

**交通：**拟建铁路和高速公路隧道长度超过5000km，近千km隧道埋深超过1000m。成兰铁路17座隧道埋深超1000m，龙门山隧道最大埋深1900m，长14.7km

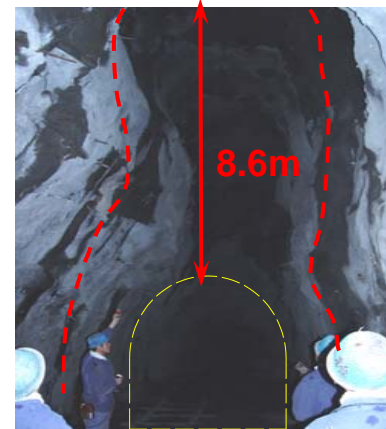
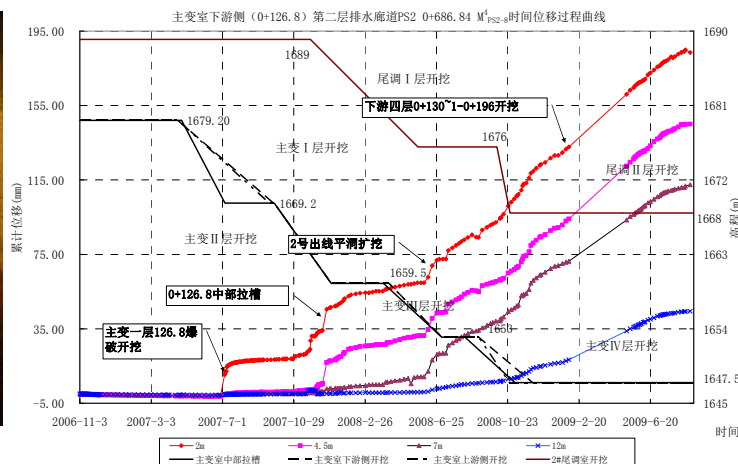
# 武汉岩土力学所

## 2、深地实验室是解决深部工程与环境安全关键难题的必要途径

**岩爆：** 高强度、高频度、时滞性强

**大变形：** 非连续、非协调

**塌方：** 体积大、范围广、衍生破坏强



**金属矿山地下灾害：** 国家安监局统计：2000-2007年间死亡17412人，百万吨死亡率0.7-1.0，导致了停产、大量宝贵矿产资源不能正常采出、采掘设备和环境严重损坏

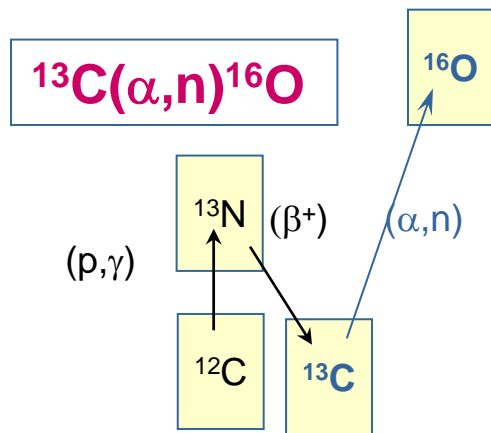
**水利水电、交通工程：** 每年深部工程灾害事故达到数千起，伤亡人数超千人，数千万元设备报废，延误工期半年甚至1年以上，经济损失巨大

# 近代物理所

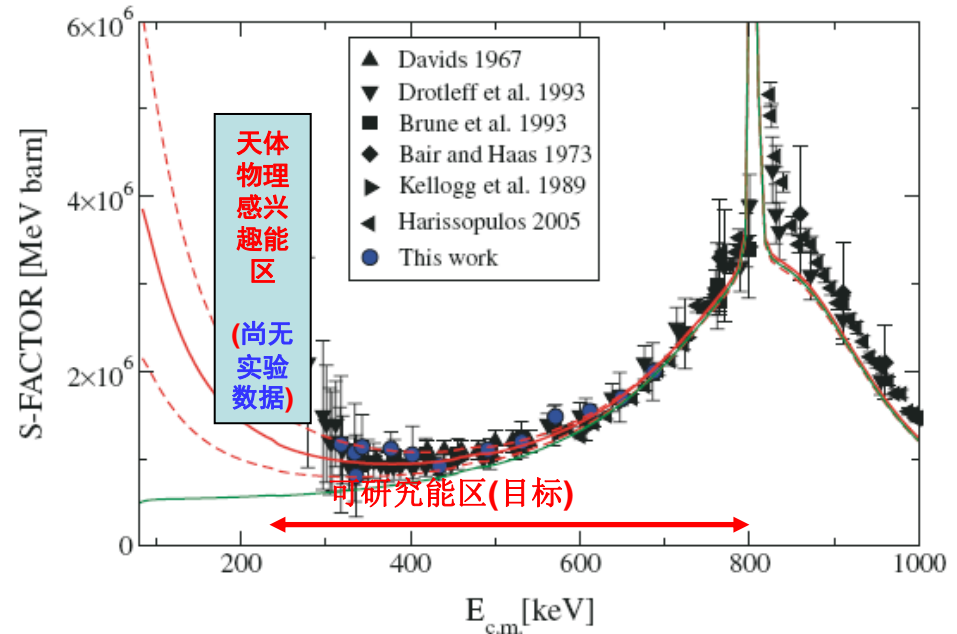
## 4、核天体物理研究

### 研究内容

天体物理慢中子俘获过程悬而未决的问题——中子流来源相关的关键核反应，涉及宇宙中重元素的合成等。



天体物理场所：  
低质量( $1.5 - 3 M_{\odot}$ ) AGB星  
燃烧温度：约0.9-2.7亿度



### $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 实验突破点:

- 可以将截面测量推进到天体物理感兴趣的Gamow能区(尚无数据)
- 在200keV能量点, 10天内就可得到10%的测量精度

# 测量与地球物理所

- 深部地球物理

- 地球内部结构探测与深部工程研究的需求

深部与地表的应变、形变、重力响应、地震波的传播等可能不一样⇒大陆深钻孔⇒深部观测可以直接观测岩体内部结构，干扰极小

- 地震灾害的监测与防治的需求

- 直接监测地表和地下地震动差异，准确了解岩体地震响应特征
- 连续直接观测深部岩石的性质变化，了解地下应力积累、孕震的情况

- 深部背景噪声环境的监测需求

- 监测地下环境噪声，对于精密科学实验极为必要



# 武汉物理与数学所

## —基于原子干涉的精密引力物理实验

- 建立一个L型垂直双臂的原子干涉仪引力波探测天线阵，开展：
  - 10m原子干涉仪单元技术与完善
  - 重力和重力梯度精密测量
  - 爱因斯坦等效原理验证实验
  - 引力波探测实验

- 召开了第S11次香山科学会议
- 锦屏II水电站业主单位—二滩水电开发责任公司大力支持和愿意共同建设国家深地实验室



**执行主席：二滩公司吴世勇副总经理**

## 香山科学会议简报

第 349 期

香山科学会议办公室

二〇〇九年十二月十日

### 深地科学的重大前沿问题

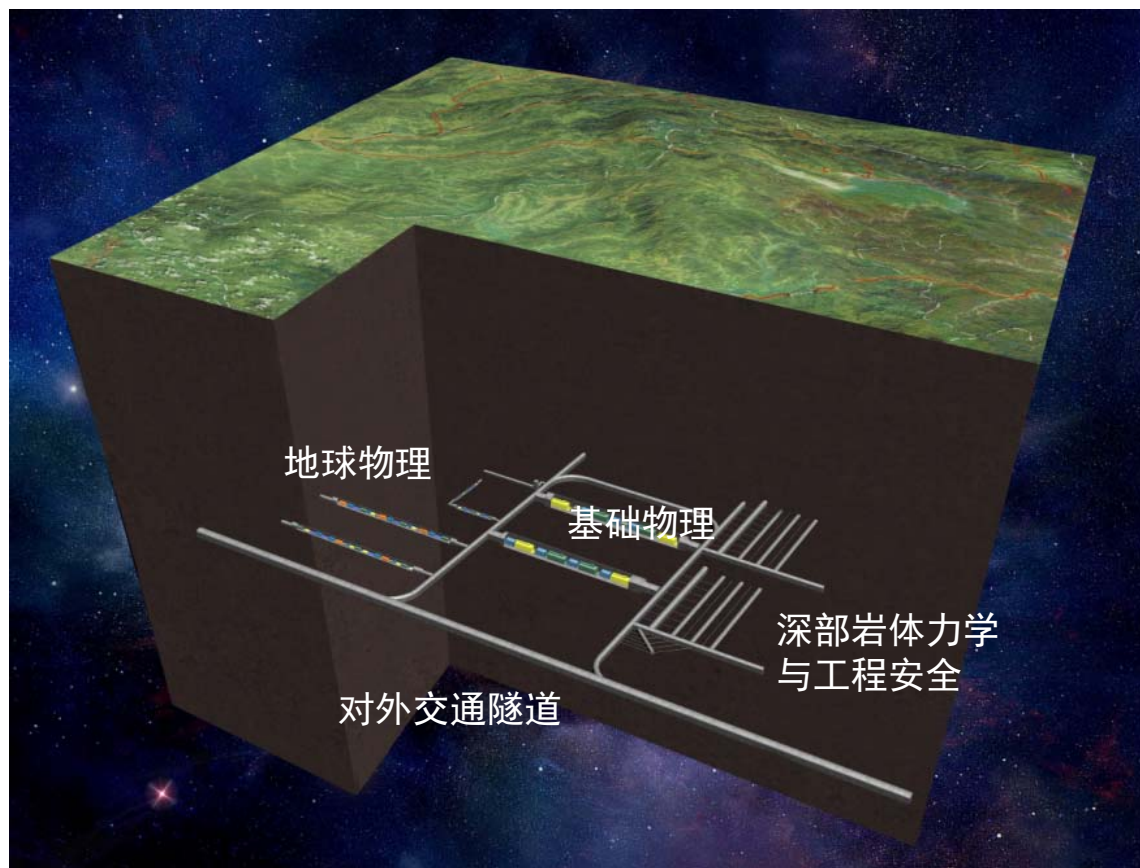
——香山科学会议 S11 学术讨论会

第 S11 次香山科学会议“深地科学的重大前沿问题”学术讨论会于 2009 年 10 月 25 ~ 26 日在北京召开。陈和生、葛修润、李惕碛、钱七虎、吴世勇、许厚泽六位研究员担任会议执行主席，来自全国科研院所、高等院校和二滩水电开发有限责任公司、华东勘测设计研究院等相关单位的 50 多位专家学者应邀参加了会议。会议以在锦屏山建设深部地下科学与工程实验室为目标，汇集了我国粒子物理、天文学、核天体物理、引力波、地球物理、岩体力学等理论的和实验的多学科跨领域的专家学者，以及锦屏水电建设的相关领导和专家，围绕深地科学实验的重大科学意义、锦屏山深地实验室建设的优势和可行性等中心议题进行了综合评述和深入讨论，并就我国建设深地科学与工程实验室的发展思路达成共识。

#### 一、会议简况

中国科学院高能物理研究所陈和生研究员作了关于“深地科学发展现

**建设目标：** 建设国际上深度最大、基础物理、岩体力学、地球物理等多学科综合交叉的国家级的深地实验室，提供重大国际合作研究平台，为国家重大工程安全建设和运行提供科学支撑，面向国内、国际开放



国家深地实验室布置示意图

# 基础物理研究对实验室的需求

- 具备水、电、通风、温湿度控制、吊车、网络、监控和其它的辅助性设施等条件, ( $\sim 15\text{m} \times \sim 15\text{m} \times \sim 100\text{m}$ ), 实验室的设计和建设满足环保、安全、消防等要求, 对国内外的研究人员开放, 吸引国际和国内的合作者开展多目标、多学科的地下实验研究.





# 地下实验室的科学目标

## 物理学

大气中微子实验 (SK)  
太阳中微子物理 (SNO)  
超新星中微子探测  
核天体物理

双 $\beta$ 衰变  
质子衰变  
暗物质  
暗能量

长基线中微子振荡实验

## 其它科学

岩土稳定性  
地球科学  
微生物学  
精密核分析 (材料)

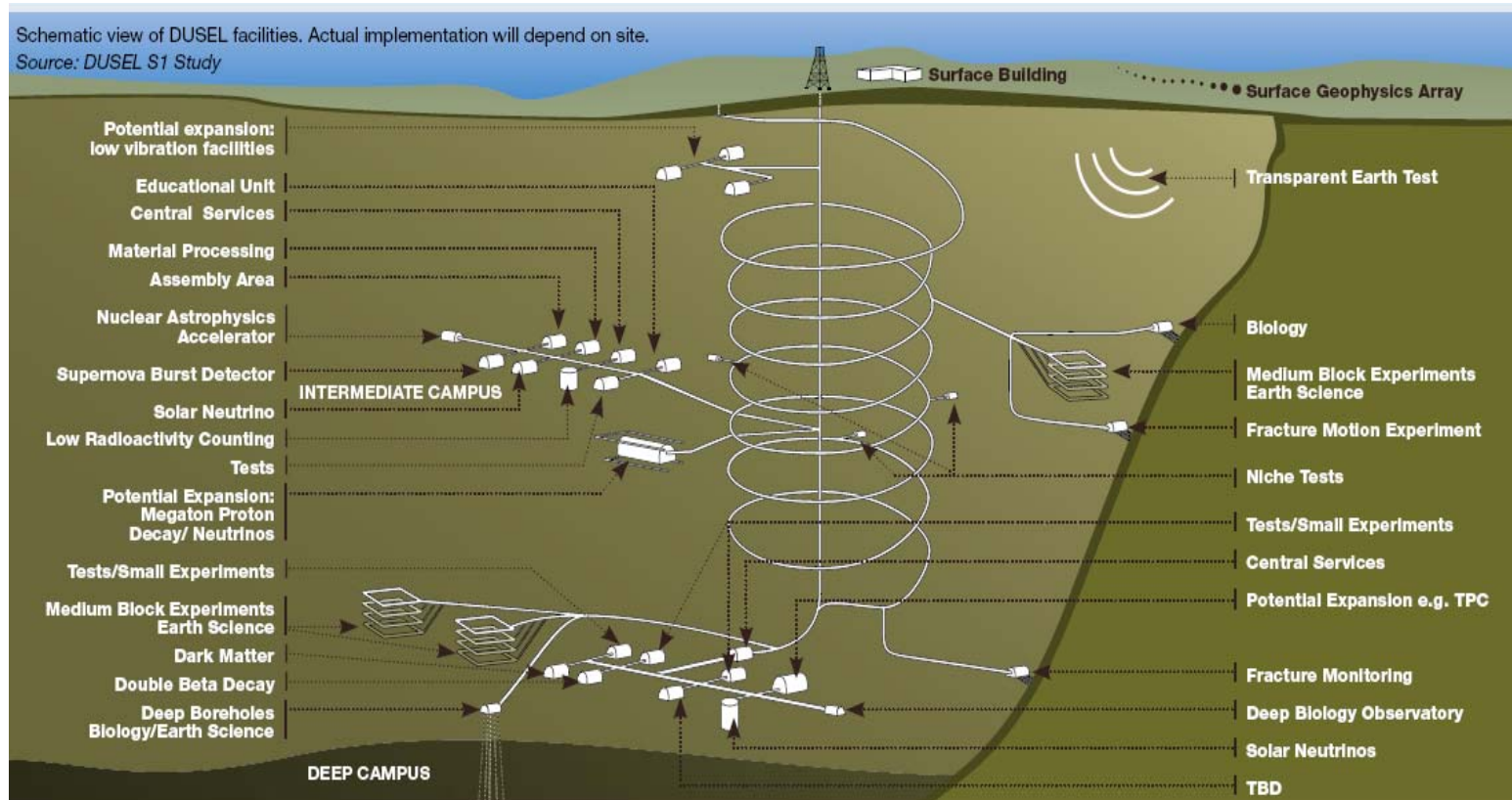
.....

# 锦屏地下实验室特点

- 埋深最大，所处环境条件复杂
  - 埋深：国外计划2km，本实验室2.5km，因此地应力及渗透压水平更高、屏蔽效果更好，所能研究科学问题也更多更广
- 布置结构巧妙，建设与运行成本较低
  - 国外的深部（埋深大于1km）地下实验室大都采用竖井—平硐结构型式，建设与运行费用高
  - 我们直接利用锦屏II水电站的交通平硐，采用平硐结构型式，建设与运行费用大幅降低、安全性更好

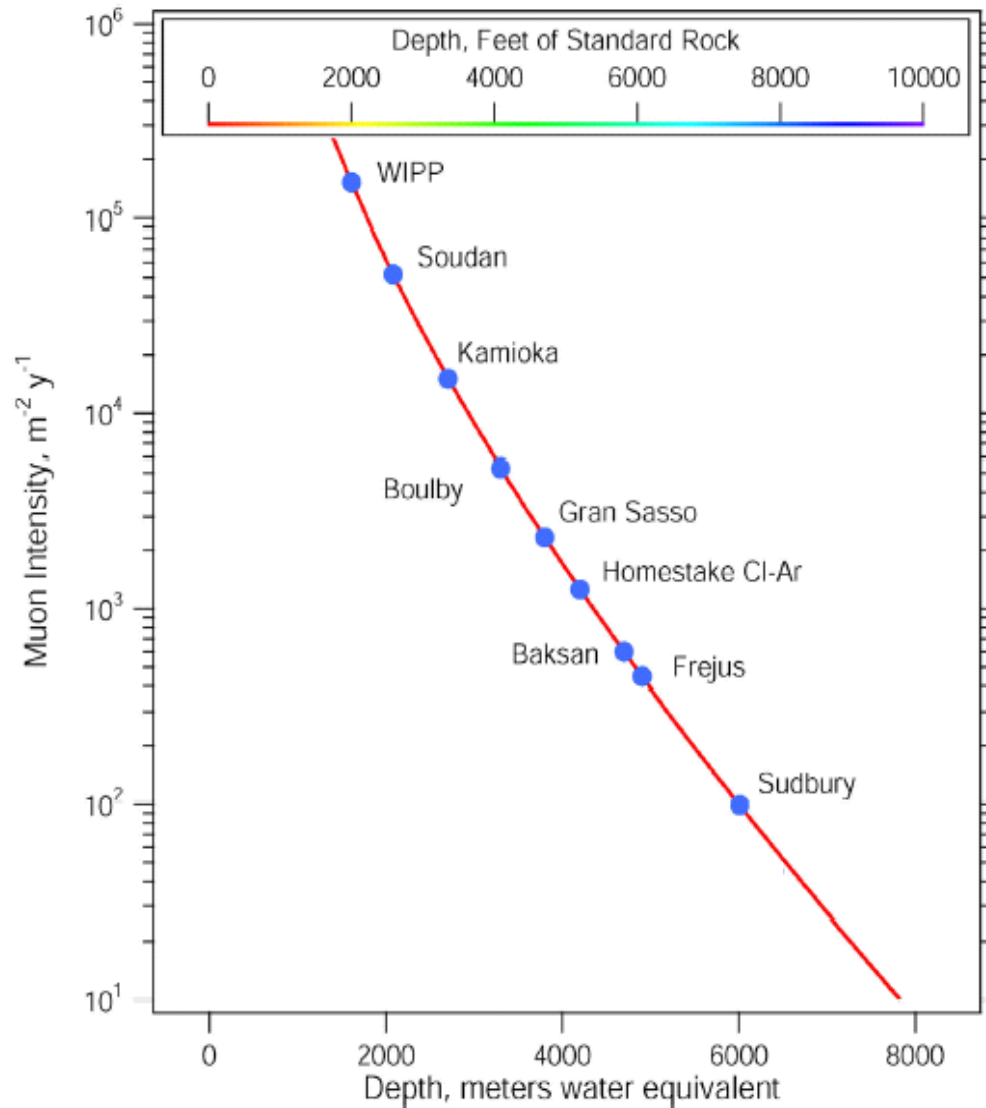
Schematic view of DUSEL facilities. Actual implementation will depend on site.

Source: DUSEL S1 Study



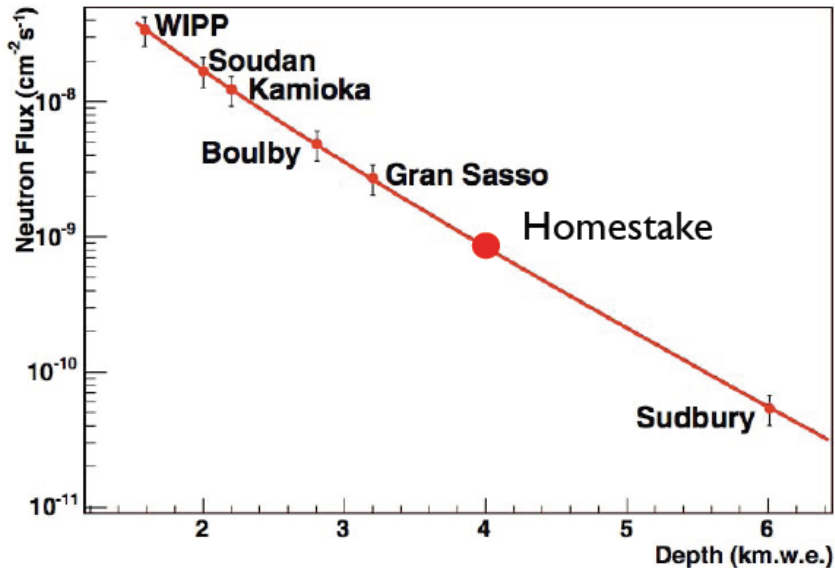
1. 深度 (Depth)
2. 方便性 (Access)
3. 环境 (Environmental control)
4. 安全 (Safety)
5. 可扩充性 (Expansion capability)
6. 经费 (Cost)

# —地下实验的魅力：低本底



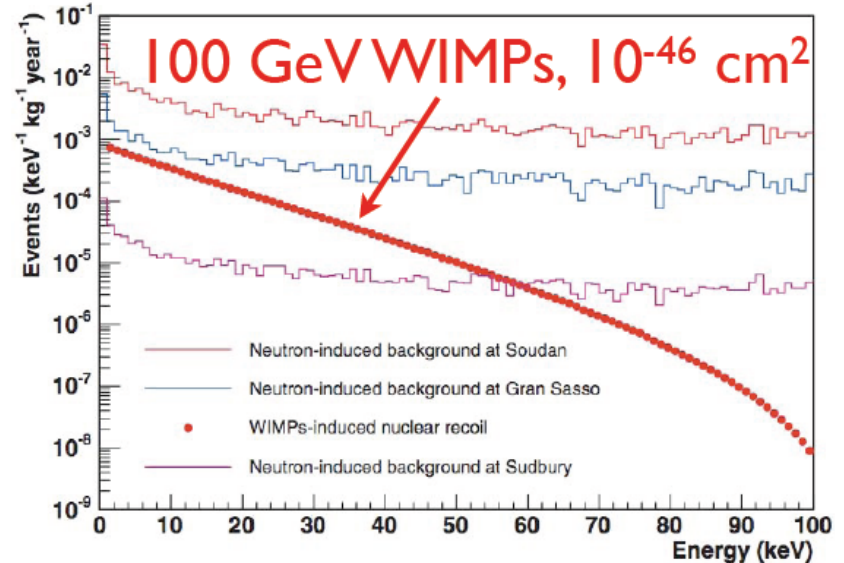
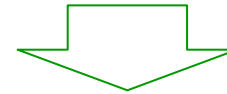
# —地下实验的魅力：低本底

每200米岩石深度减小宇宙线产生的中子本底约一倍



*muon induced neutron flux*

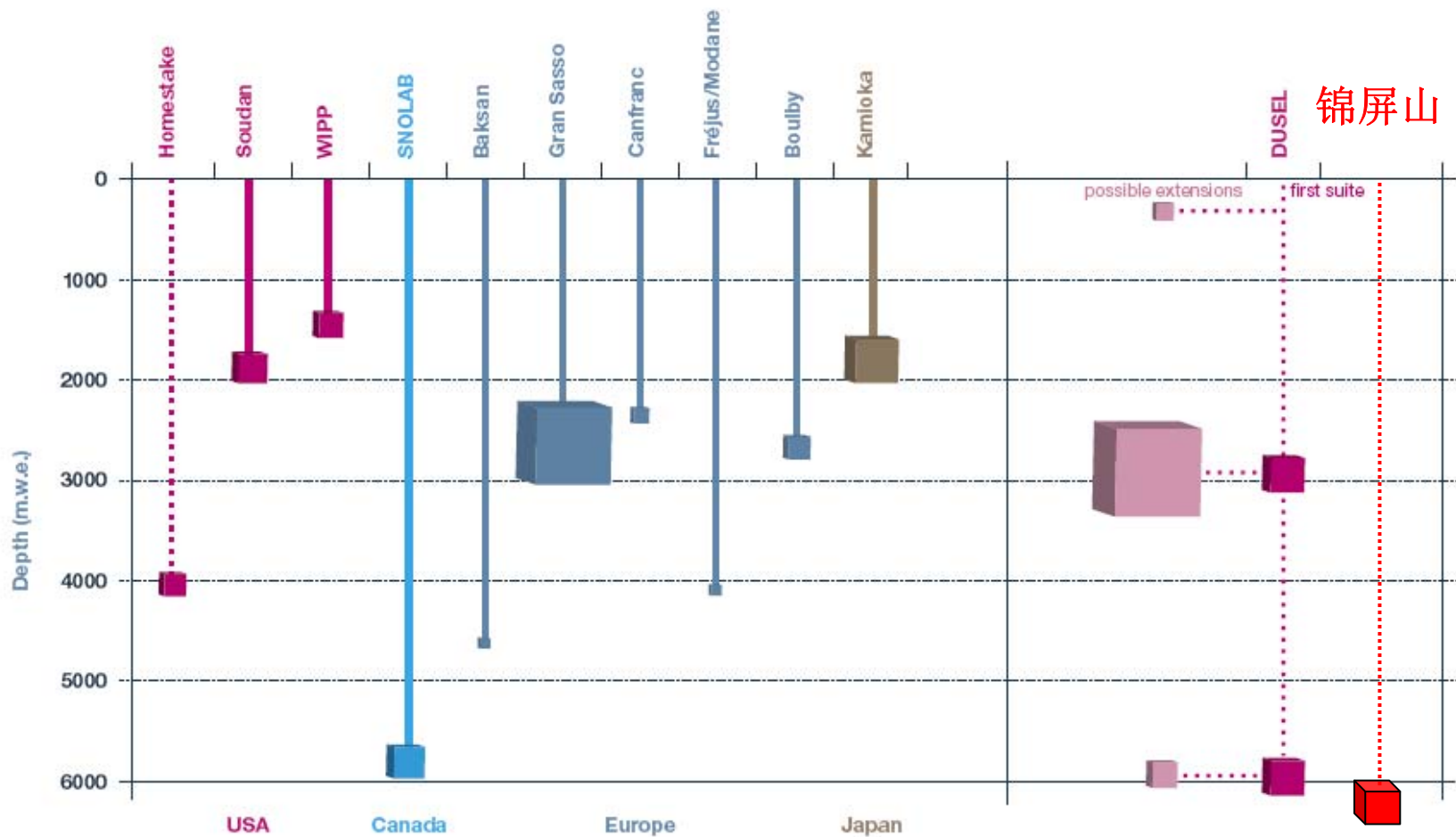
本底越小，信号才会高于本底而被测量到



*signal/background event rates*



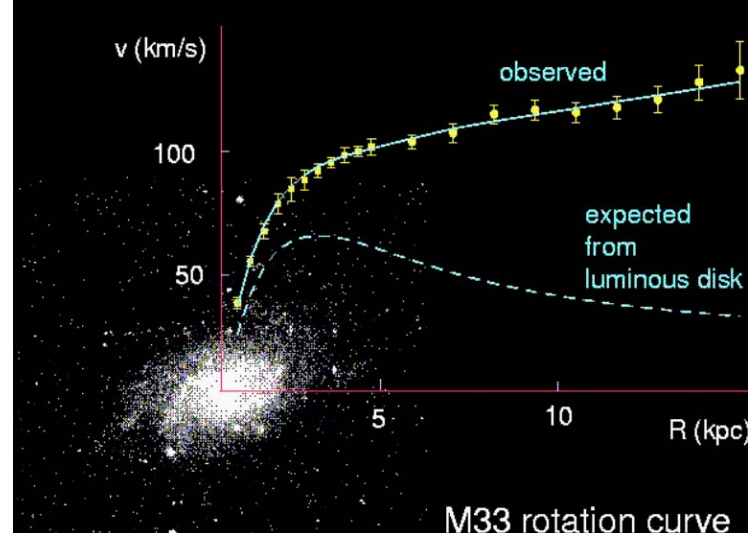
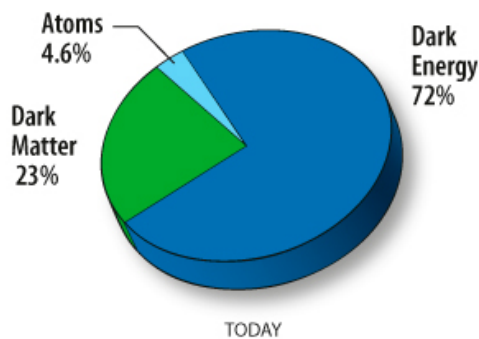
# 地下实验室的深度及规模



# 目前概况

- 已建立以高能所、武汉岩土动力学研究所牵头的多个研究所合作关系
- 确定了三个实验室的联系人
  1. 深地岩体力学工程安全；
  2. 深部地球物理；
  3. 地下基础物理学；
- 中科院基础局直接协调
- 已得到院方向性课题支持

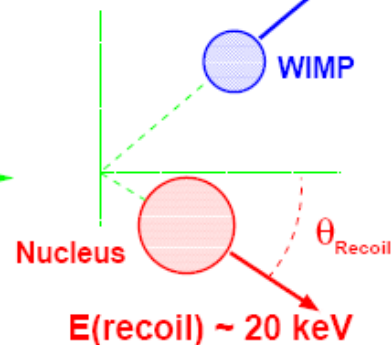
# 暗物质的测量



## • 直接测量 (地下)



Elastic WIMP scattering



事例率低 ( $10^{-46}$  cm<sup>2</sup> is  $\sim 1$  event/yr/ton)

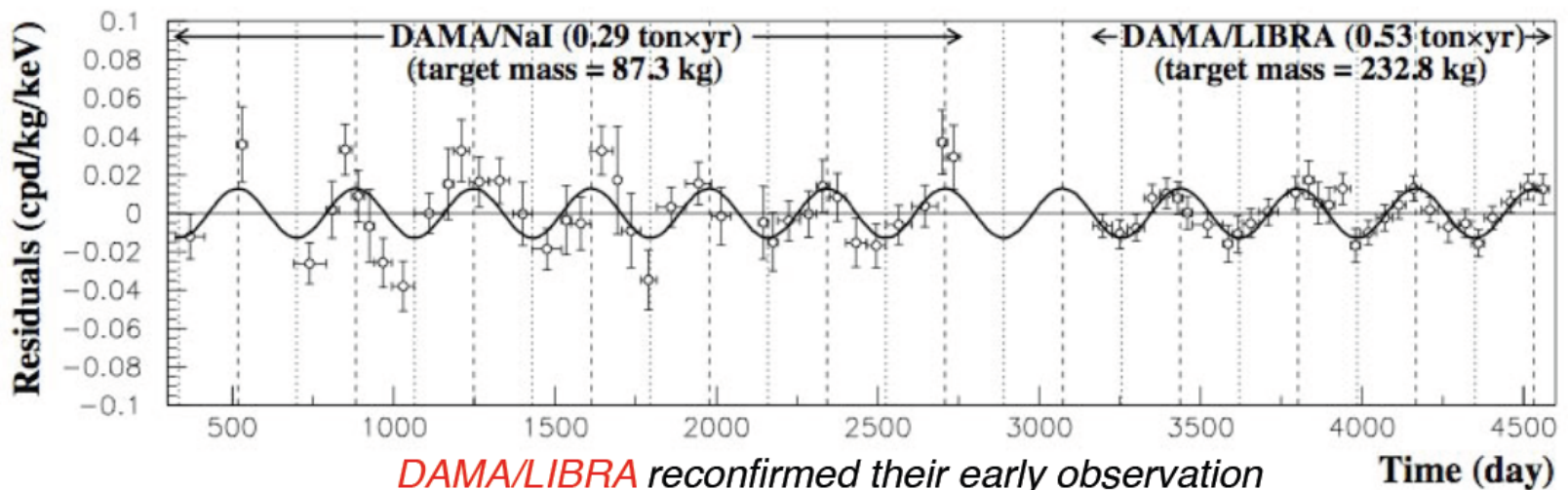
反冲核能量低 (降低能量测量阈能)

更深的覆盖层成为必需, 因为宇宙线 $\mu$ 子:

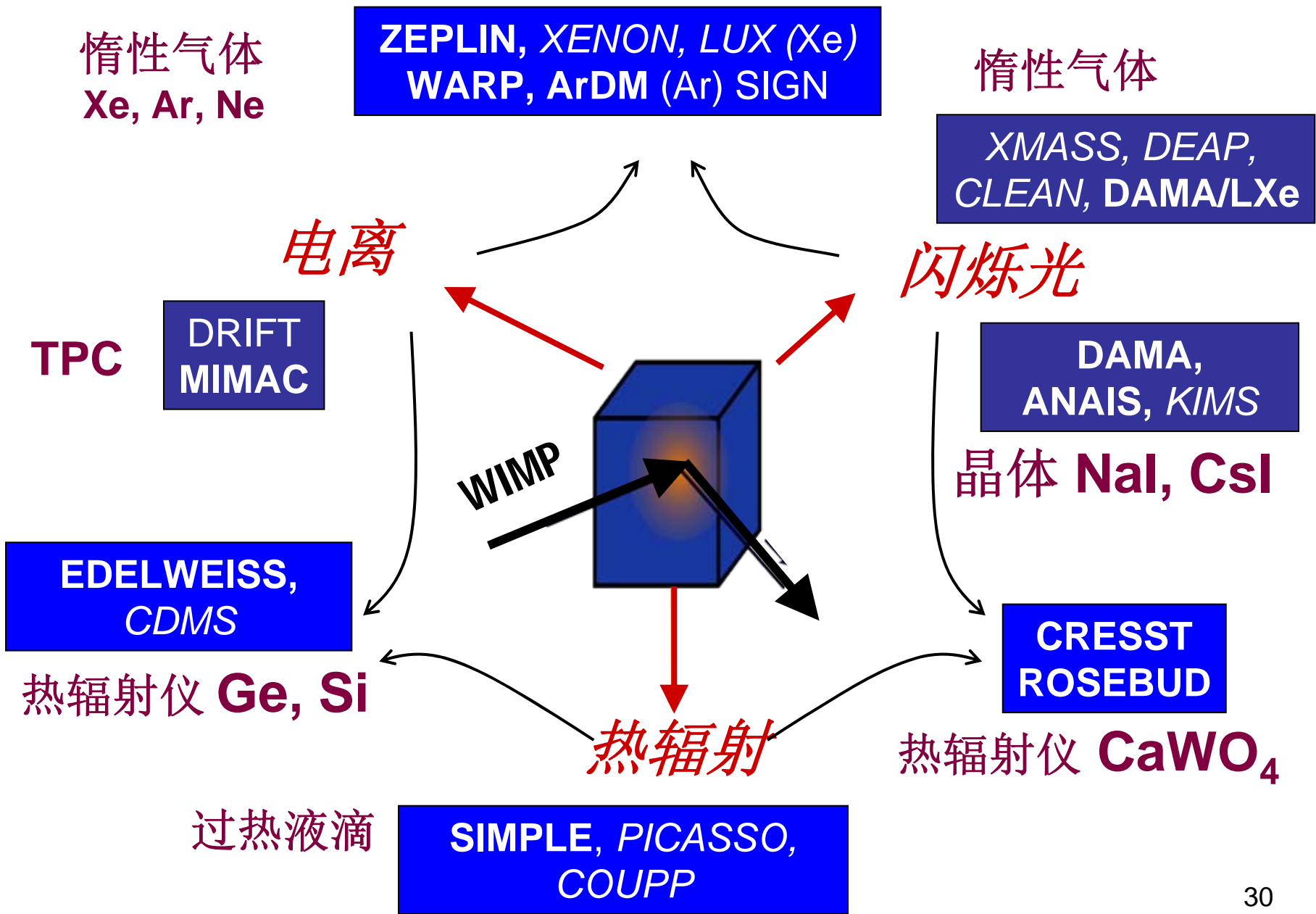
- 可以不穿过探测器而产生中子,  $\beta$ 和 $\gamma$ 本底;
- 会产生不希望的放射性同位素;
- 会产生不必要的探测器死时间



2-6 keV

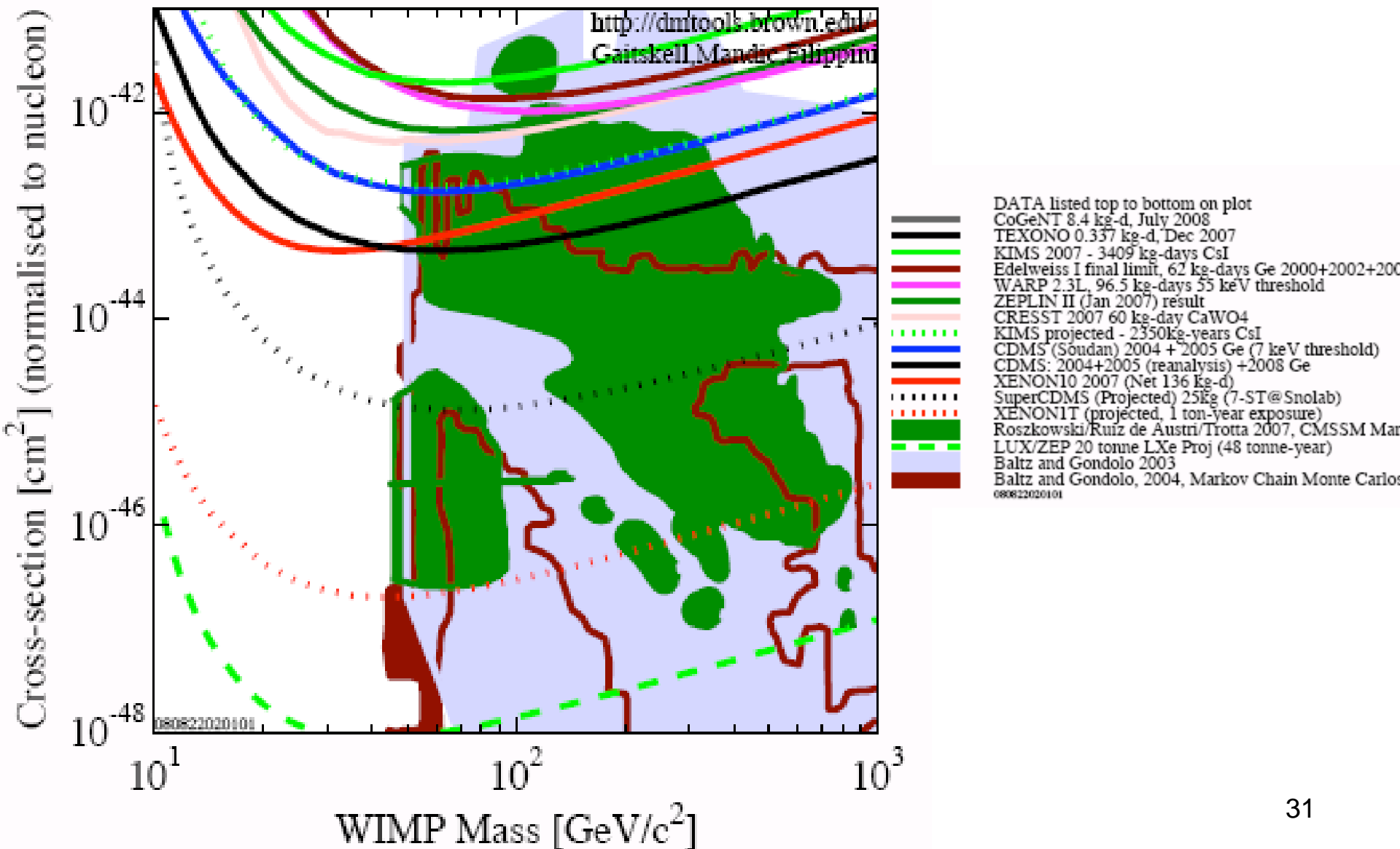


*DAMA/LIBRA* reconfirmed their early observation of annual modulation signal [arXiv:0804.2741]



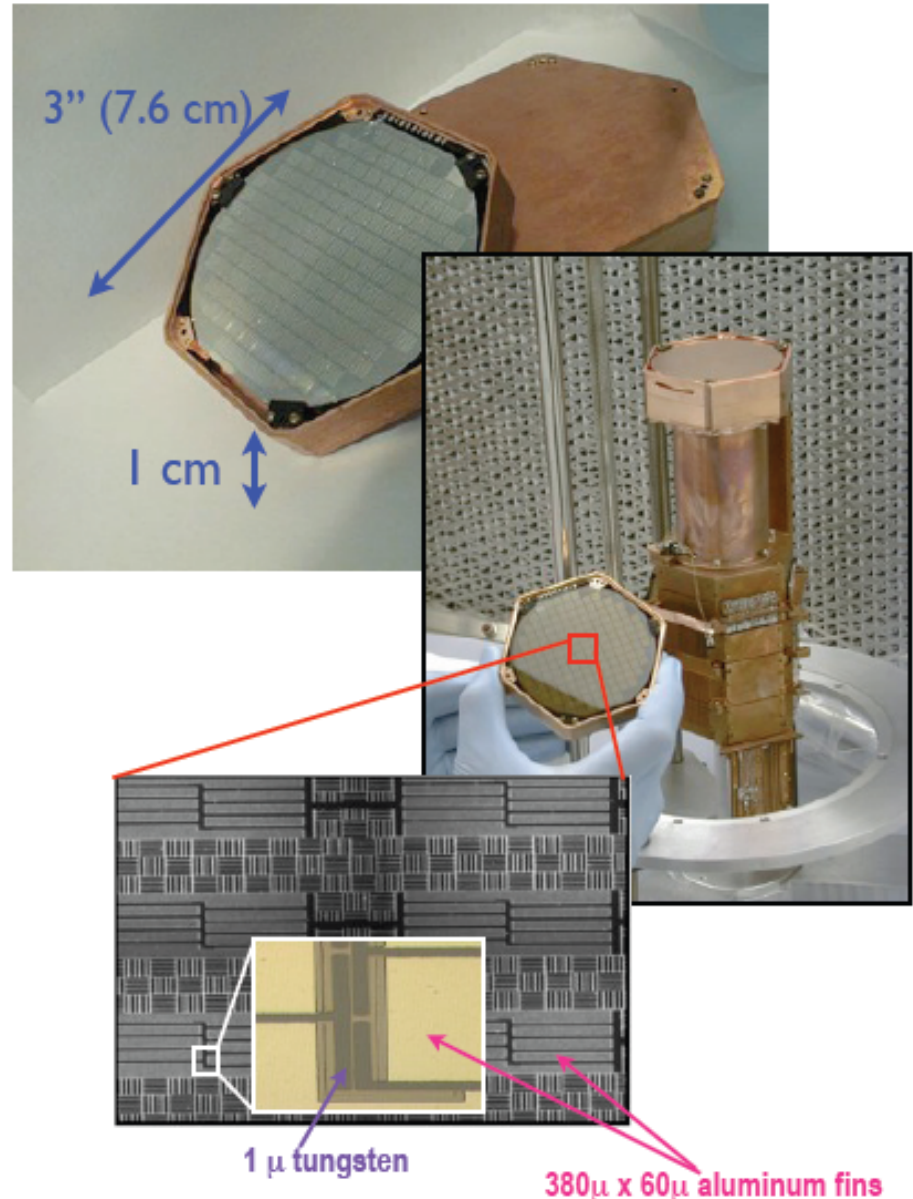


# 目前国际暗物质地下实验的测量结果及未来规划



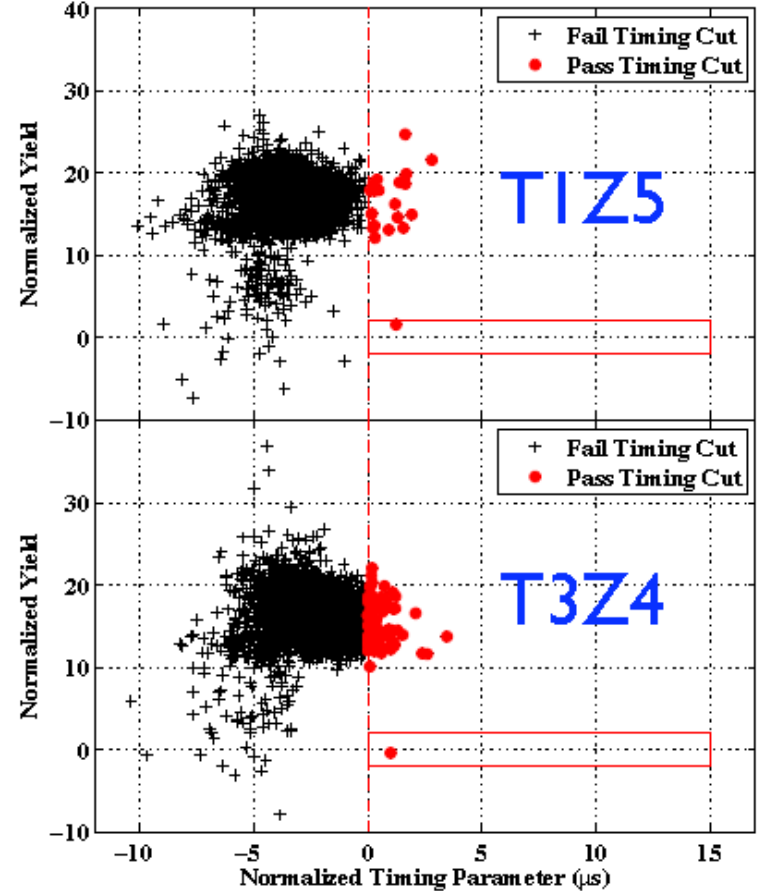
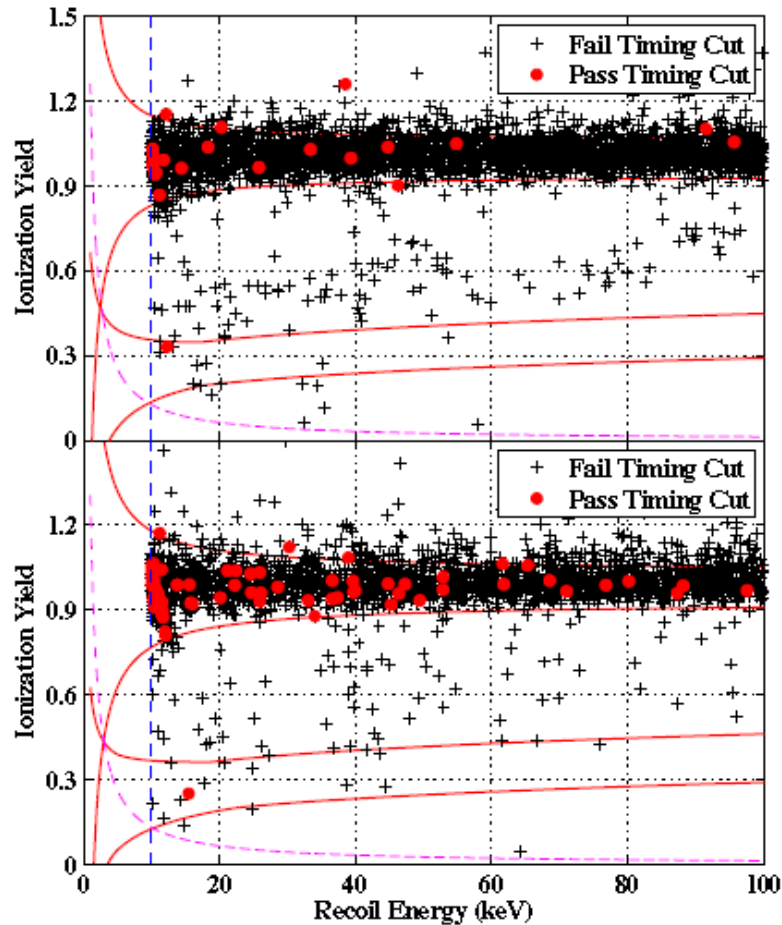
# CDMS-II ZIP Detectors

- **Z**-sensitive **I**onization and **P**hason mediated
- **230 g Ge** or **100 g Si** crystals (1 cm thick, 7.5 cm diameter)
- Photolithographically patterned to **collect athermal phonons** and **ionization signals**
- xy-position imaging
- Surface (z) event rejection from pulse shapes and timing
- **30 detectors** stacked into **5 towers** of 6 detectors

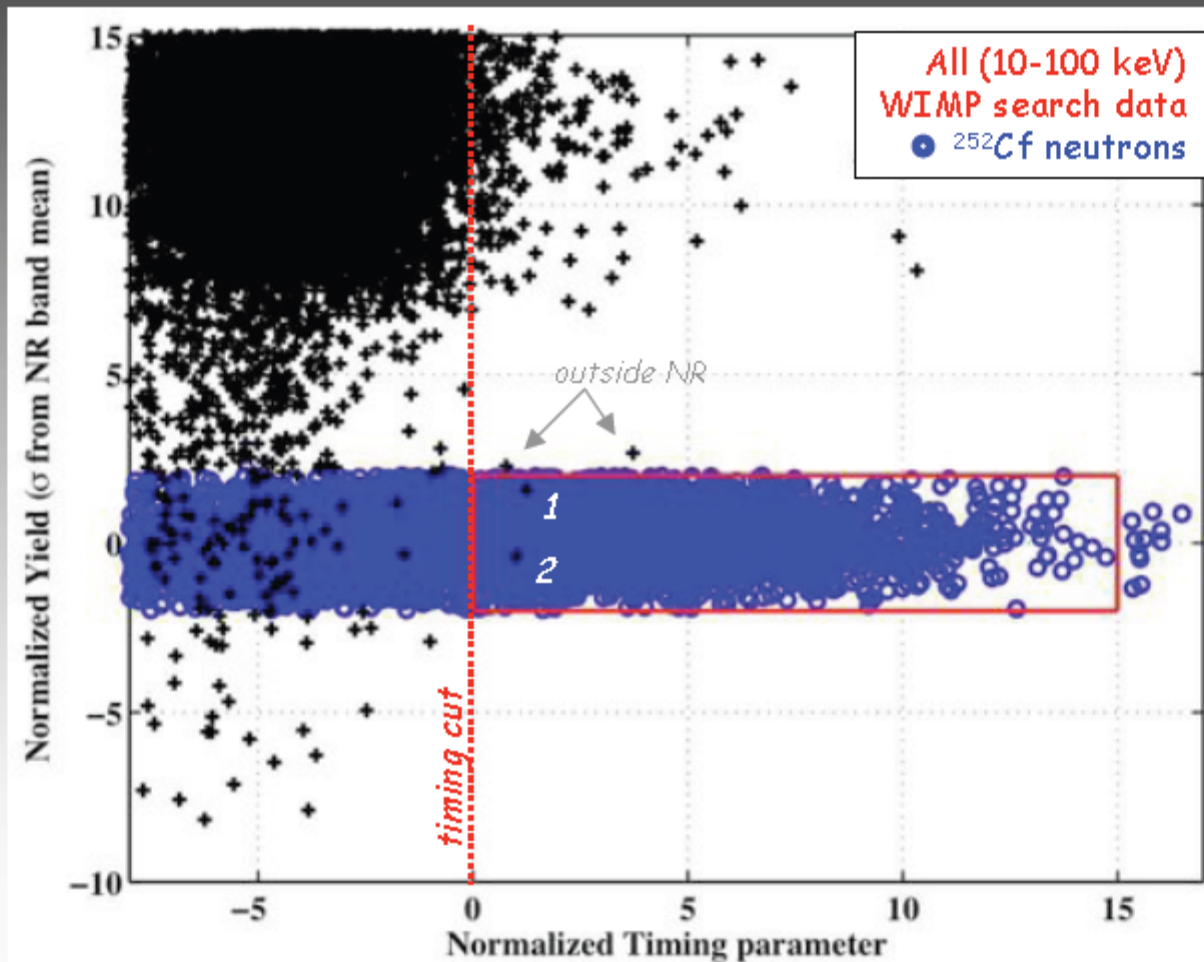


# Event Yield, Timing and Energy

arXiv: 0912.3320



# Alternate View w/ Timing w/ Calibration Data





# CoGeNT:

neutrino & astroparticle physics using large-mass, ultra-low noise germanium detectors

(ANL, CANBERRA, LLNL, PNNL, ORNL, SNL, UC, UNC, UW)

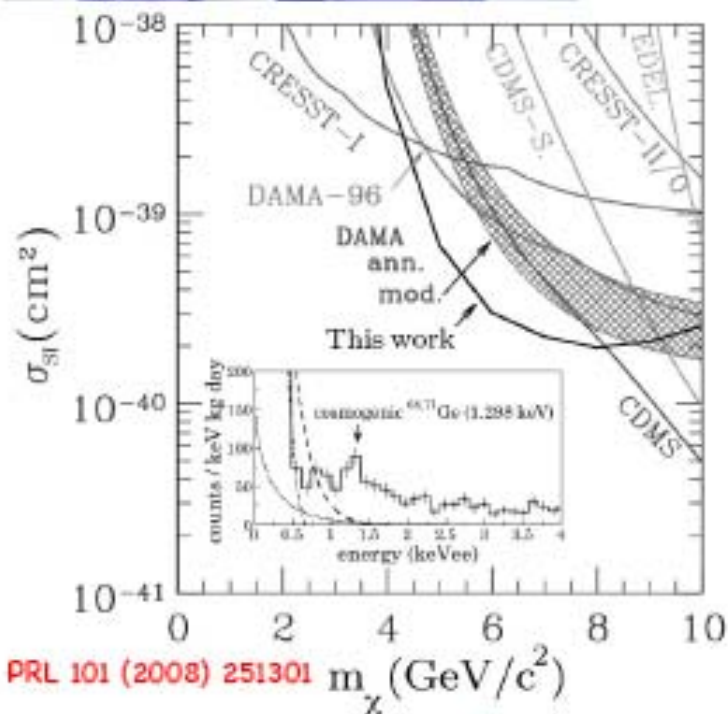
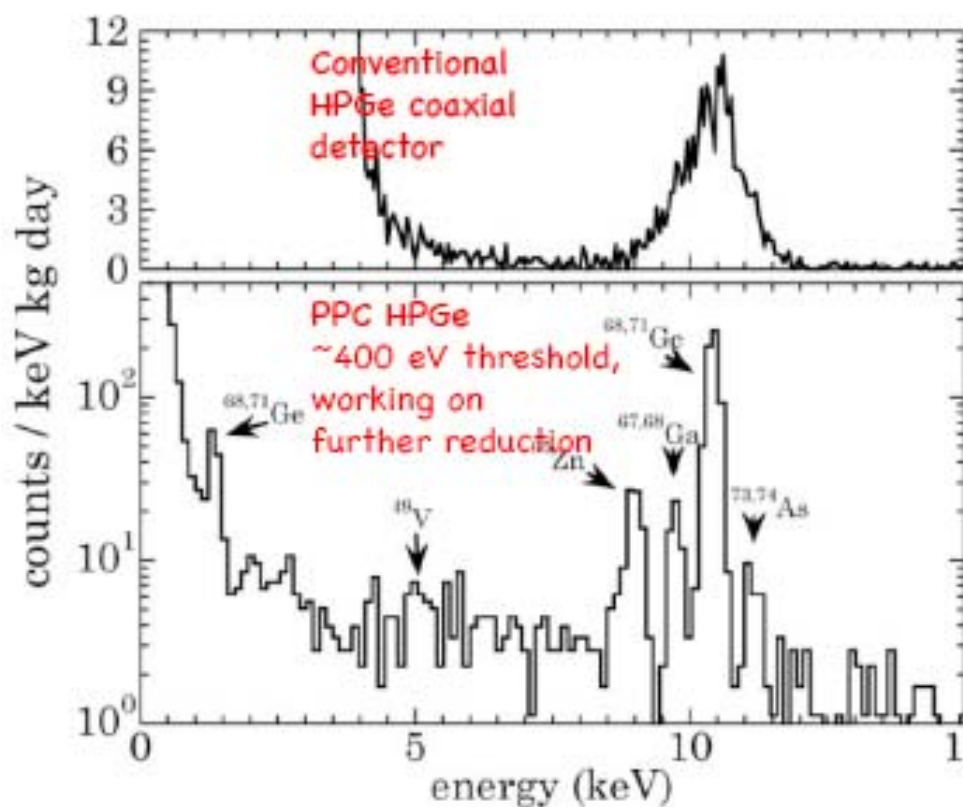
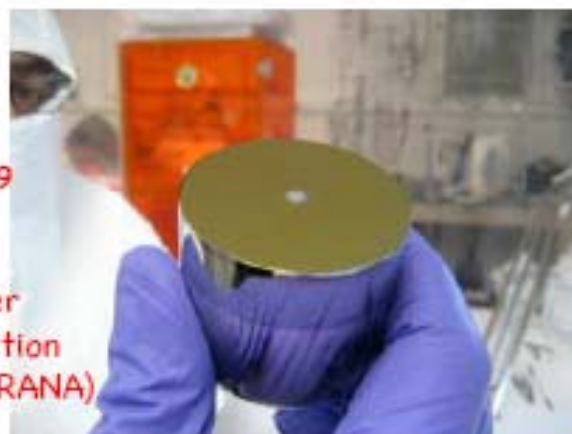
(mostly a tentacle of MAJORANA)

PPC HPGe

JCAP 09(2007)009

Applications:

- Light Dark Matter
- Coherent  $\nu$  detection
- $\beta\beta$  decay (MAJORANA)



Extensive constraints on DAMA's claim:

- Light WIMPs
- Dark scalars
- Dark pseudoscalars



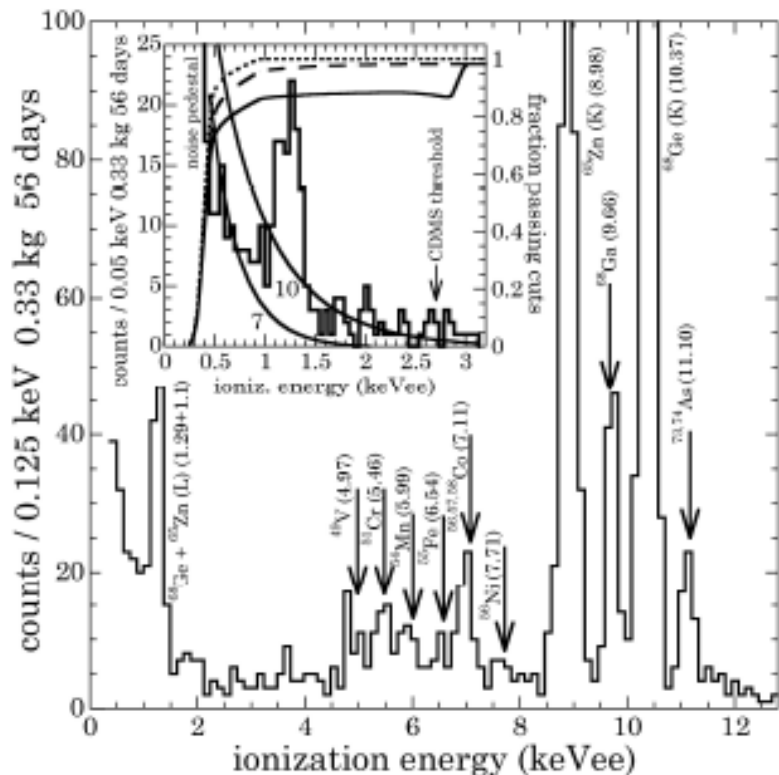
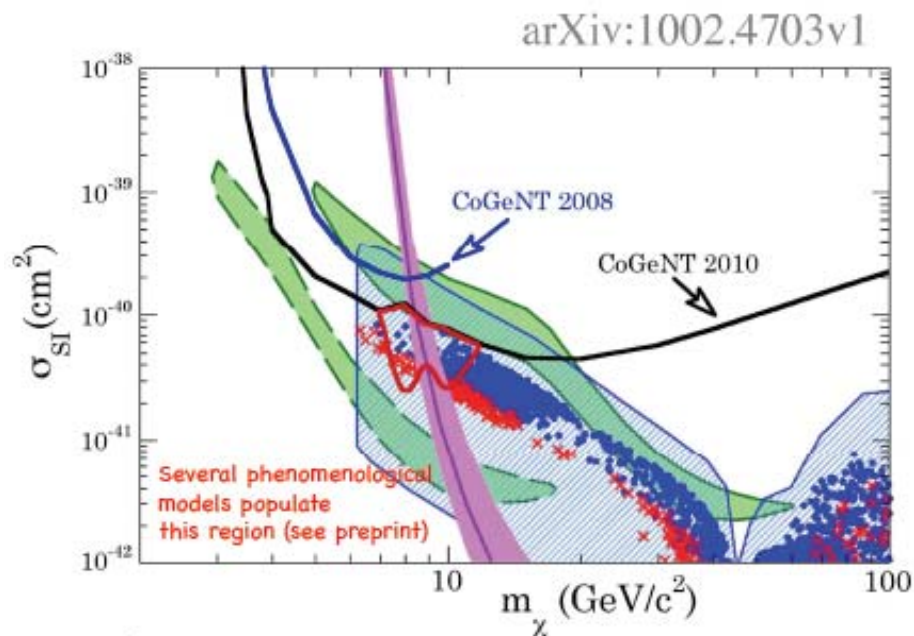


FIG. 3: Low-energy spectrum after all cuts, prior to efficiency corrections. Arrows indicate expected energies for all viable cosmogenic peaks (see text). *Inset*: Expanded threshold region, showing the  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{68}\text{Ge}$  L-shell EC peaks. Overlapped on the spectrum are the sigmoids for triggering efficiency (dotted), trigger + microphonic PSD cuts (dashed) and trigger + PSD + rise time cuts (solid), obtained via high-statistics electronic pulser calibrations. Also shown are reference signals (exponentials) from 7  $\text{GeV}/c^2$  and 10  $\text{GeV}/c^2$  WIMPs with spin-independent coupling  $\sigma_{SI} = 10^{-4} \text{pb}$ .

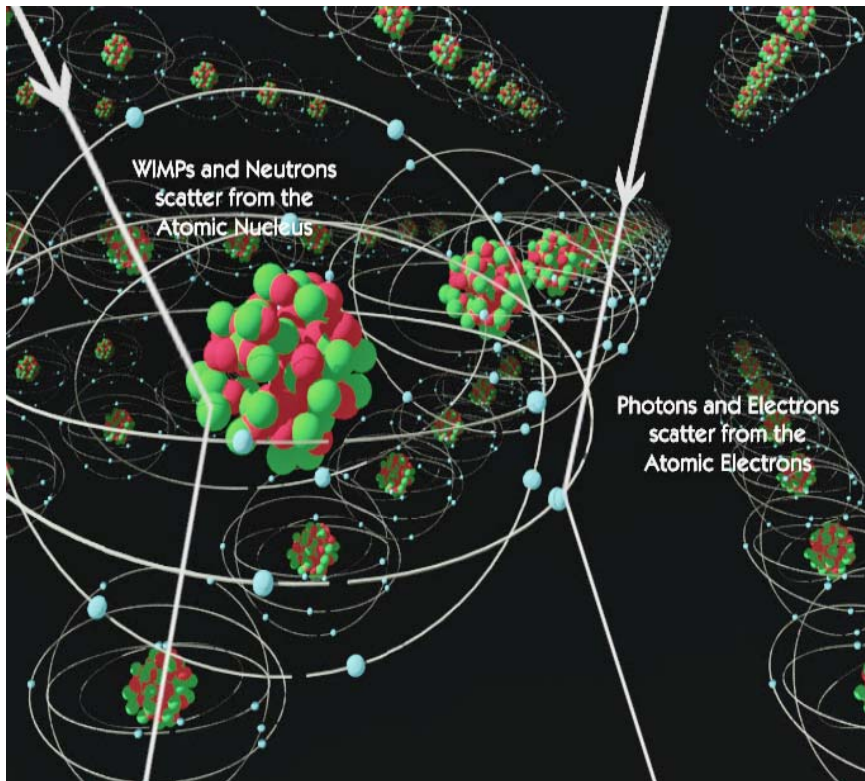


- 能区分出是暗物质粒子吗？本底有多大？

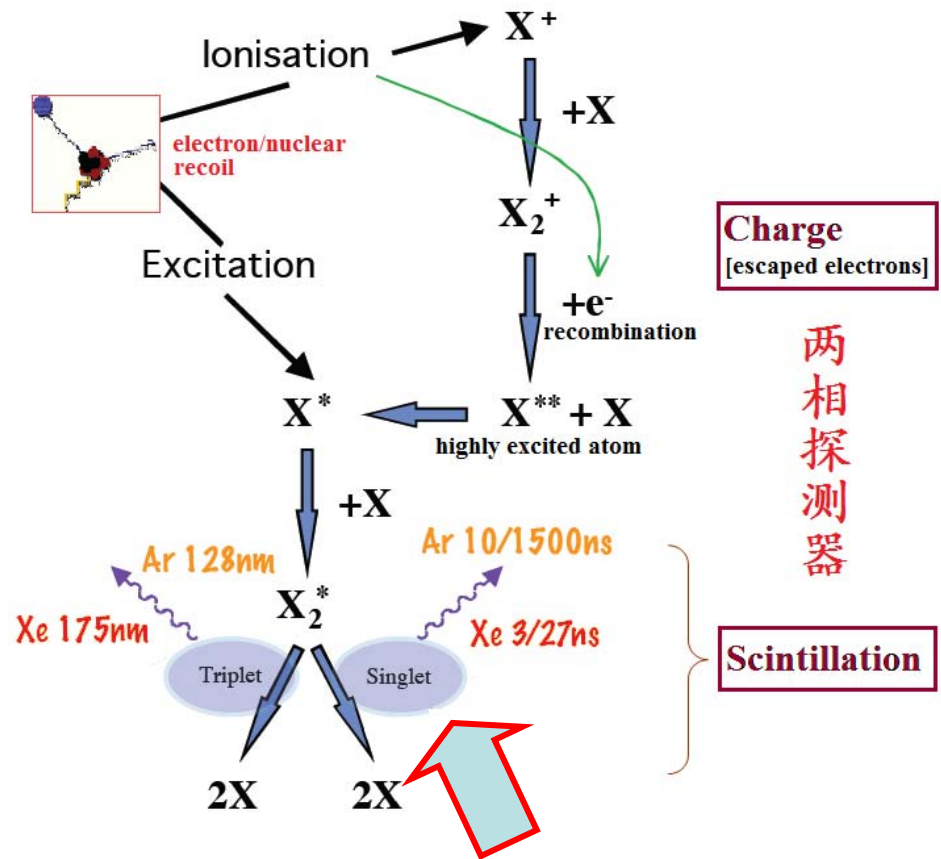
# “有”结果实验小结

- 现实状况：
  - ① 实验的本底不够低（实验室不够深是原因之一，来自于探测器表面的本底是另一个原因）；
  - ② 阈能和探测器质量不能兼顾（核反冲的测量阈能：高纯锗  $\sim 0.5\text{keVr}$  < 晶体  $\sim 2\text{keVr}$  < 液氙  $\sim 8\text{keVr}$
  - ③ 质量不容易做大：高纯锗  $\sim$ 几公斤 < 液氙  $\sim 100$ 公斤（有效质量） < 晶体  $\sim 250$ 公斤
- 现有实验的结果：DAMA（晶体），CDMS（高纯锗），CoGeNT（点接触高纯锗）或多或少，未能肯定的测量结果倾向于低质量的暗物质粒子，探测器应该向低阈的方向发展（？）
- 暗物质粒子的识别（类中子）

# 暗物质的直接探测 使用液氩/氙



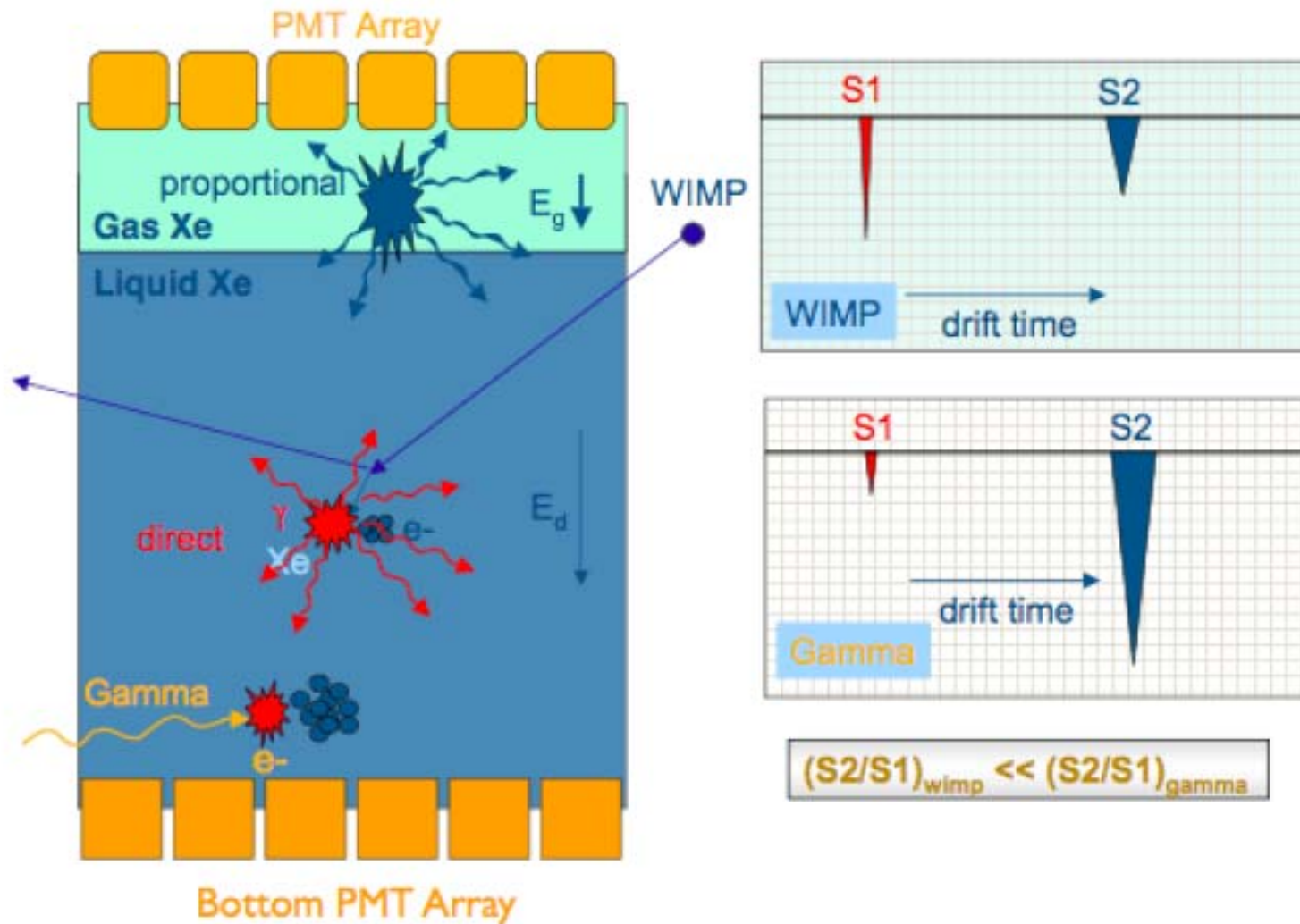
## Interaction process in Ar/Xe



- Search for collisions of relic WIMPS with ordinary nuclei.
- Nuclear recoil energy  $< 100 \text{ keV}$
- Low rate expected
  - Few events/ton/year if  $\sigma \sim 10^{-46} \text{ cm}^2$

两相信号的测量可以有效的排除发生在探测器表面的本底

# 两相信号的比值（排斥比：~200）

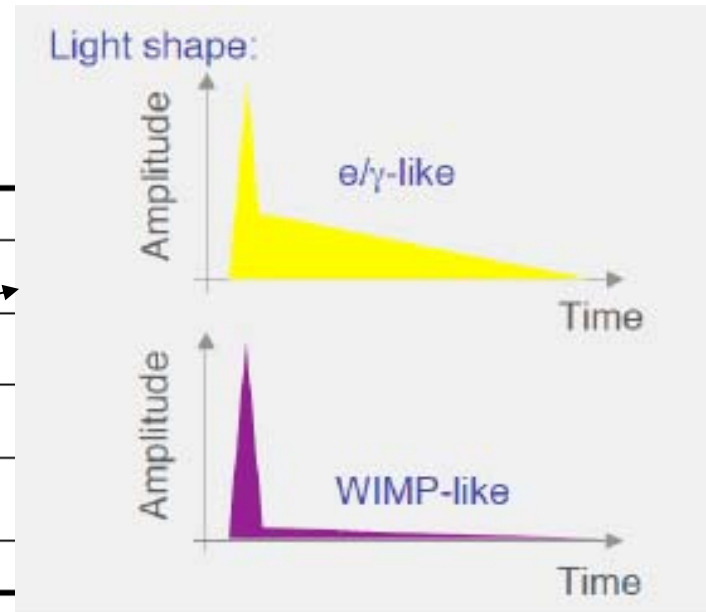


event-by-event discrimination (>99.5%) against dominant background ( $\gamma, e, \alpha$ ) by:

- Simultaneous Detection of scintillation (S1) and ionization (S2)

# 液氩的暗物质直接探测(PSD)

Properties	LAr	LXe	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO
Density	1.4	3.1	3.67	4.51	7.1
Z(effective)	18	54	51	58	74
$\tau$ (ns)	10/1500	3/27	230	1000	300
Photo/MeV	$4 \times 10^4$	$2.5-7.8 \times 10^4$	$4.3 \times 10^4$	$6.5 \times 10^4$	$2.8 \times 10^4$
$\lambda$ (nm)	125	178	415	565	480



- **Pulse shape discrimination of primary scintillation (S1)** based on the very large difference in decay times between singlet ( $\approx 7$  ns) and triplet ( $1.6 \mu\text{s}$ ) components of the emitted UV light
  - Minimum ionizing: triplet/singlet  $\sim 3/1$
  - Nuclear recoils: triplet/singlet  $\sim 1/3$
  - Theoretical Identification Power exceeds  $10^8$  for  $> 60$  photoelectrons (Boulay & Hime 2004)



# 液氙/氙对比：“A Multi-Purpose Matrix”

	Xe	Ge	LS	Ar
DM	X	X	-	X
DBD	X	X	-	-
Solar $\nu$	X	?	X	X
SN	-	-	X	X
p-decay	-	-	X	X
LBL	-	-	-	X

DM: 暗物质探测

DBD: 双贝塔衰变

Solar  $\nu$  : 太阳中微子测量

SN: 超新星中微子测量

P-decay: 质子衰变

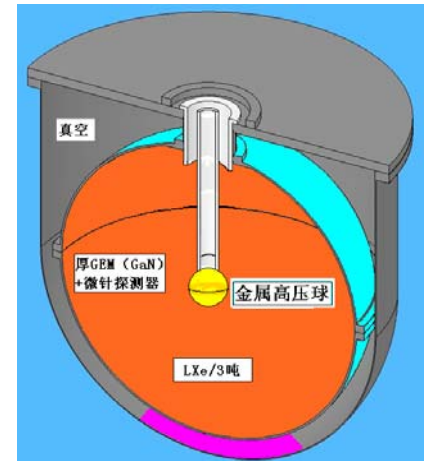
LBL: 长基线中微子测量

液氙探测器技术应用更为广泛。

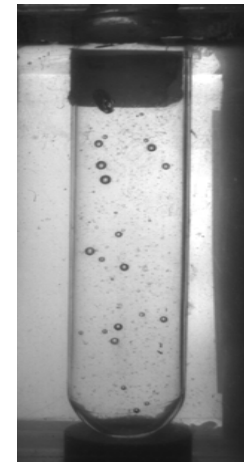
# 暗物质探测

## 暗物质探测预研

- 晶体探测技术研究（近期）；液氙探测技术研究（长远）（高能所）；过热液滴探测技术研究（有潜力）（原子能院）；
- 我们希望构建一个有自主创新性的实验方案，在暗物质被发现之前尽快加入到暗物质探测的世界前沿；
- 同时我们也准备着参与到国际合作中去共同进行暗物质探测的研究；
- 即使暗物质被发现了，我们仍然需要暗物质探测的测量站：“Even if a discovery is made before DUSEL, we need a dark matter observatory”  
（美国负责规划DUSEL的官员Bernard）



液氙探测器示意图



过热液滴探测器

# 结束语

- 我们有机会建成条件最好的深地实验室！
- 建立国家实验室是一个很好的设想。
- 基于暗物质探测的重要意义和实验的进展，我们应该尽早开始国家地下实验室的建设；
- 需要列入十二五规划，以取得最佳时机；
- 即使暗物质很快被发现，地下实验室的建设仍然有着广泛和长远的需求，它的作用是不可替代的。

谢谢!