

# 直接探测暗物质 复合晶体方案设计与进展

马欣华，戴长江

973启动会

2010年3月18日

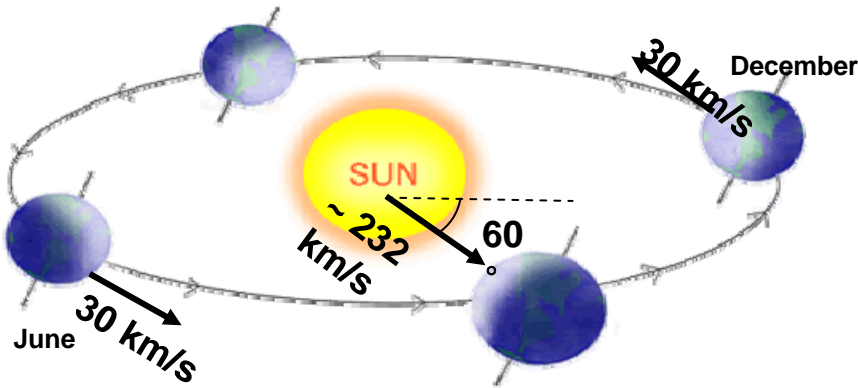
# 内容

1. 复合晶体方案的确立依据
2. 复合晶体方案的进展情况
3. 总结

# 1. 复合晶体方案的确立依据

采用  $\text{CaF}_2$  (Eu) /  $\text{BaF}_2$  复合晶体阵列直接观测暗物质<sup>1</sup> 调制，以高灵敏度<sup>3</sup> 既侧重自旋相关<sup>2</sup> 的观测，又兼顾自旋无关的观测。

采用CaF2 (Eu) /BaF2复合晶体阵列直接观测暗物质 **年调制**，以高灵敏度既侧重自旋相关的观测，又兼顾自旋无关的观测。



- $v_{\text{sun}} \sim 232 \text{ km/s}$  (Sun velocity in the halo)
- $v_{\text{orb}} = 30 \text{ km/s}$  (Earth velocity around the Sun)
- $\gamma = \pi/3$
- $\omega = 2\pi/T$       $T = 1 \text{ year}$
- $t_0 = 2^{\text{nd}} \text{ June}$  (when  $v_{\oplus}$  is maximum)

$$v_{\oplus}(t) = v_{\text{sun}} + v_{\text{orb}} \cos\gamma \cos[\omega(t-t_0)]$$

$$S_k = S_{0,k} + S_{m,k} \cos[\omega(t-t_0)]$$

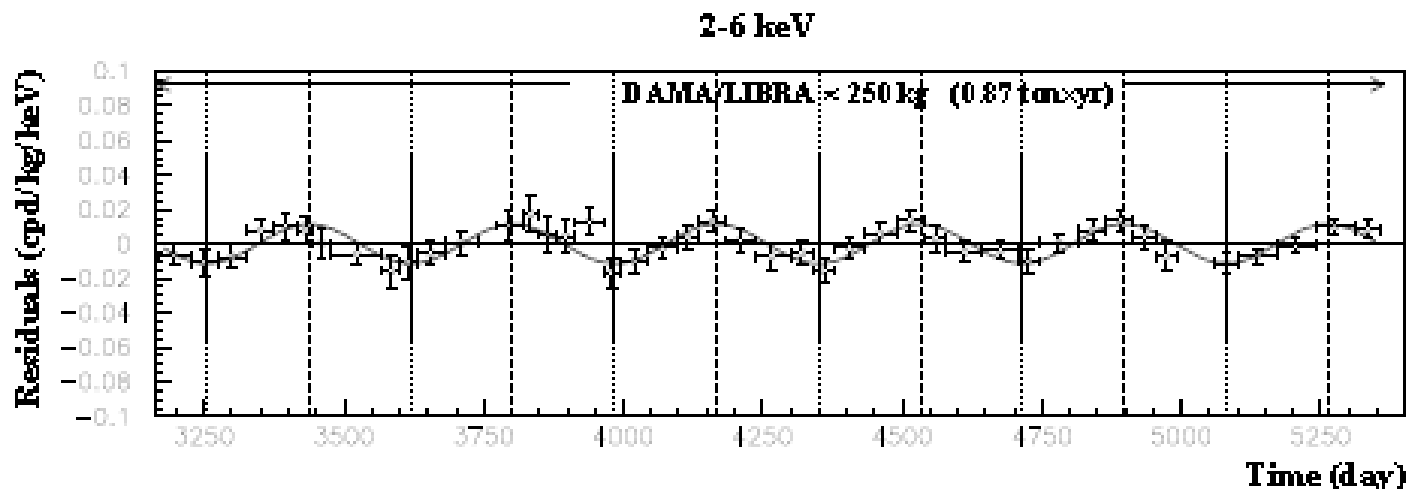
六个重要的特征：

1. 呈cosine 函数
2. 周期一年
3. 初相位（极大值处）约六月二日
4. 调制幅度  $\leq 7\%$  (halo分布的要求)
5. 单击中事例
6. 低能区的事例

这六个重要的特征是本底所不全具备的，因而据此可把暗物质和本底区分开。

# DAMA的进展

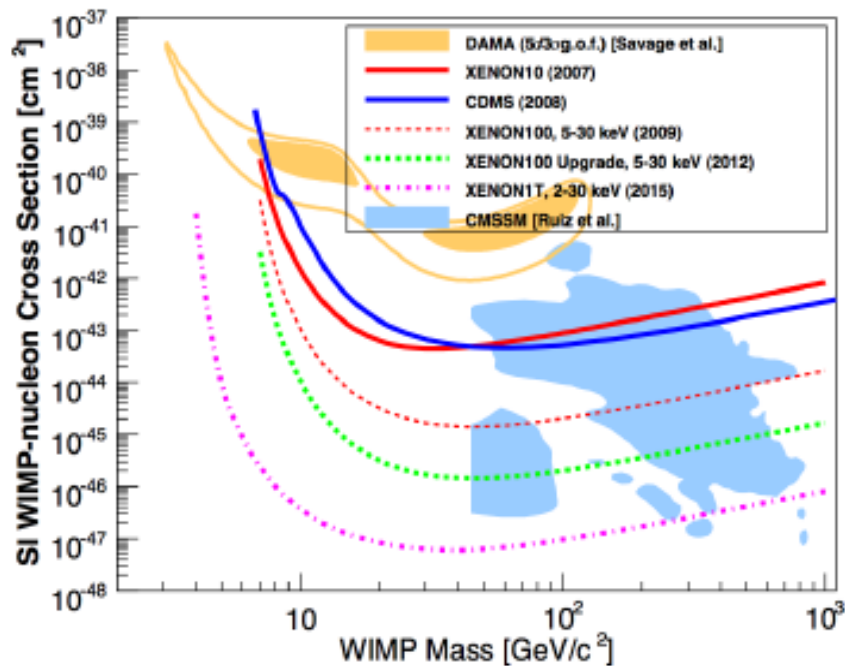
- DAMA以超低放射性NaI(Tl)晶体在LNGS探测暗物质，到目前为止，先是DAMA/NaI（100kg）运行7年，后是DAMA/ **LIBRA(250 Kg)**运行6年，总曝光量**1.17吨年**，获**13个年调制周期**，以**8.9倍标准偏差**的显著性给出年调制信号，这可能是暗物质存在的重要证据。



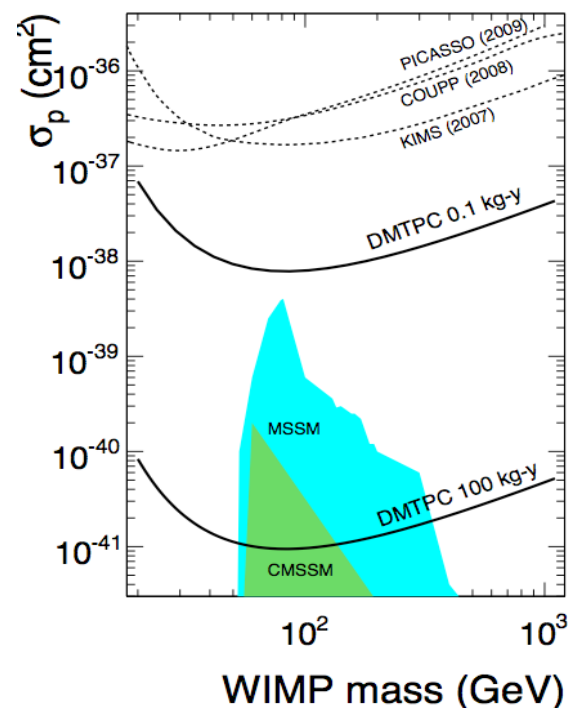
采用CaF<sub>2</sub> (Eu) /BaF<sub>2</sub>复合晶体阵列直接观测暗物质年调制，以高灵敏度既侧重**自旋相关**的观测，又兼顾自旋无关的观测。

- DAMA的年调制是侧重于自旋无关的；如果以**自旋相关**的探测途径来观测暗物质的年调制，那就将从另一个角度确定暗物质的存在，又可检验DAMA的结果。

## 自旋无关



## 自旋相关



- 理论预言，自旋**相关**作用截面比自旋**无关**作用截面要大 **$10^6$**
- 实验状况，自旋**相关**上限比自旋**无关**上限**高** **$10^6$**
- 目前自旋**无关**实验已经达到**百公斤**量级，而自旋**相关**实验不过**公斤**量级

采用CaF<sub>2</sub> (Eu) /BaF<sub>2</sub>复合**晶体**阵列直接观测暗物质年调制，  
以高灵敏度既侧重自旋相关的观测，又兼顾自旋无关的观测。

### 理论预期的暗物质作用类型

- 核反冲
  - SI: 自旋**无关**弹性散射
  - SD: 自旋**相关**弹性散射
  - **非**弹性散射
- 电子反冲
  - 一些实验将其作为本底扔掉了，不免可惜
- 核反冲 → 电磁辐射 (e<sup>-</sup>, γ, x-ray)
  - channeling effect (晶体)
  - Migdal effect (原子的外层束缚电子)

**晶体可以得到以上所有类型的信号**



采用**CaF<sub>2</sub> (Eu) / BaF<sub>2</sub> 复合**晶体阵列直接观测暗物质年调制，以高灵敏度既侧重自旋相关的观测，又兼顾自旋无关的观测。

**优势：高的信号/本底比**

**信号方面：高的信号事例率**

SD:暗物质自旋**相关**弹性散射( $\sigma \sim \text{spin factor}$ )：**19F**最高

	<sup>23</sup> Na	<sup>127</sup> I	<b><sup>19</sup>F</b>	<sup>129</sup> Xe	<sup>131</sup> Xe
Spin factor	0.041	0.007	<b>0.647</b>	0.124	0.055

SI:暗物质自旋**无关**弹性散射( $\sigma \sim A^2$ )：**137Ba**，**138Ba**最高

	<b>F</b>	Na	Ca	I	Xe	<b>Ba</b>
A	19	23	40	127	129,131	<b>137,138</b>

# 晶体性能的比较

	光输出 (photons/keV)	发射 波长 (nm)	光电子数(bi- alkali PMT) (photons/keV)	探测阈 能 (keVee)	内部放射性	已有的实 验
NaI(Tl)	38(100%)	415	8(100%)	2	$^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}, ^{40}\text{K}$	DAMA, ANAIS, NAIAD
CsI(Tl)	61(160%)	550	3.6(45%)	3	$^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}, ^{40}\text{K},$ $^{137}\text{Cs}, ^{134}\text{Cs}, ^{87}\text{Rb}$	KIMS
CaF <sub>2</sub> (Eu)	19(50%)	435	4(50%)	3	$^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}, ^{40}\text{K}$	Kamioka, ELEGENT
BaF <sub>2</sub>	12(32%)	310	3.2(40%)	4	$^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}, ^{40}\text{K}$	

- NaI(Tl)信号最强，探测阈能最低，内部放射性本底最低
- CaF<sub>2</sub>(Eu)+BaF<sub>2</sub>信号强度适中，探测阈能较低，内部放射性本底很低

综合信号/本底之比较：

对于 **SI**: NaI(Tl)第一， CaF<sub>2</sub>(Eu)+BaF<sub>2</sub>次之。

对于 **SD**: CaF<sub>2</sub>(Eu)+BaF<sub>2</sub>明显优势， NaI(Tl)次之。

兼顾**SI&SD**,并考虑新的探测内容， **CaF<sub>2</sub>(Eu)+BaF<sub>2</sub>**最优。

# CaF<sub>2</sub> (Eu) / BaF<sub>2</sub>复合晶体探测器

## 特点：小结

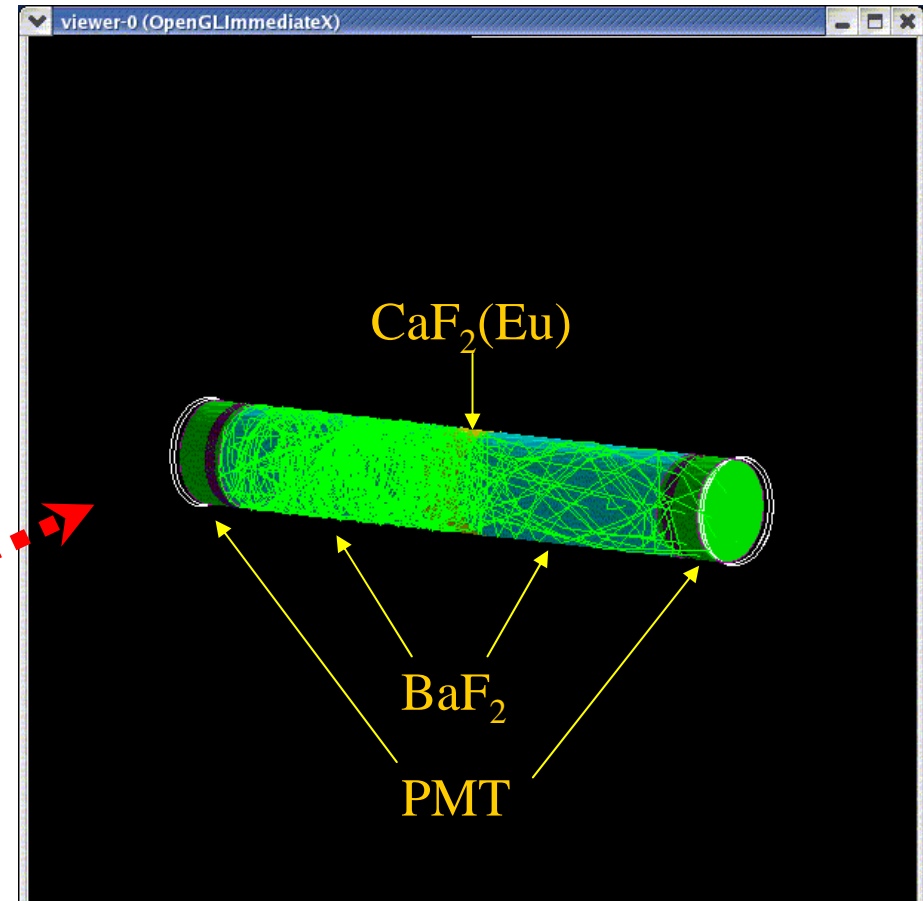
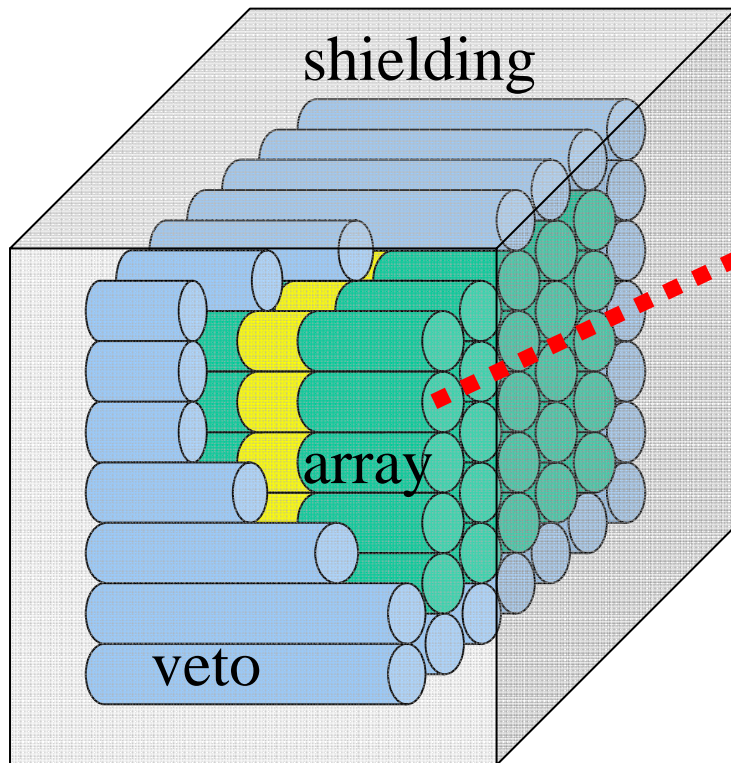
- A. 此复合晶体将观测暗物质的所有信号，以高灵敏度既侧重自旋相关的观测,又兼顾自旋无关的观测。
- B. 低放射性本底：CaF<sub>2</sub>(Eu) / BaF<sub>2</sub>的内部放射性与NaI一样，除了<sup>238</sup>U,<sup>232</sup>Th,<sup>40</sup>K外，没有别的特殊放射性本底。
- C. CaF<sub>2</sub> (Eu) / BaF<sub>2</sub>高低能区优势互补，并可达到低的探测阈能，并实现高信噪比
- D. 较易实现大规模运行以及长期稳定性。

## 2. 复合晶体方案的进展情况

1. 探测器结构
2. 探测器模拟
3. 电子学设计
4. 预期结果
5. 探测器调研
6. 预算

## 2.1 探测器结构

将来数百公斤到吨级  
复合晶体阵列

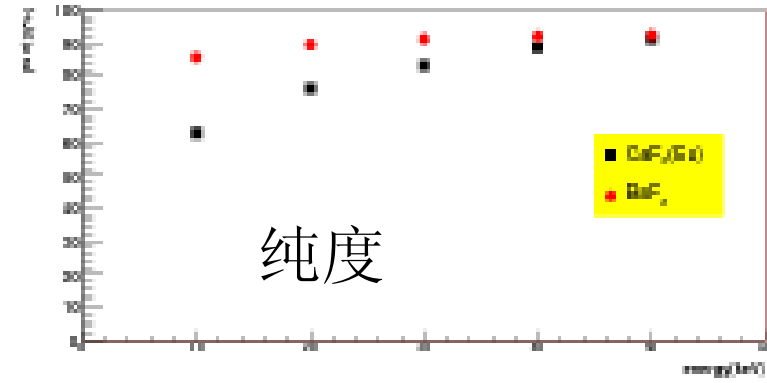
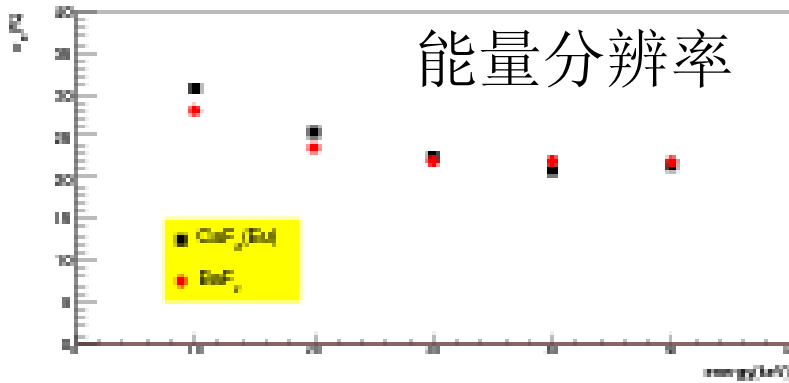
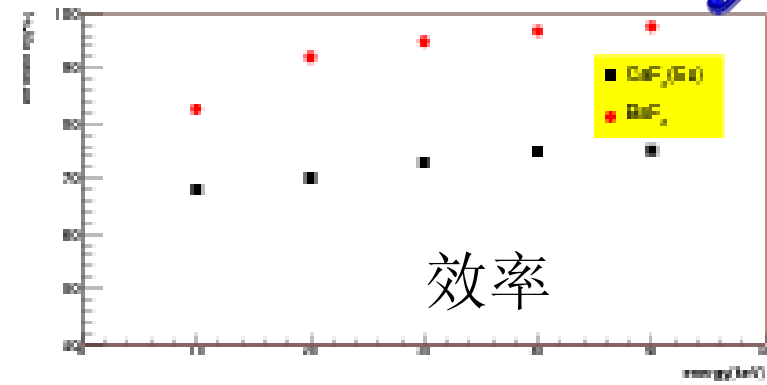
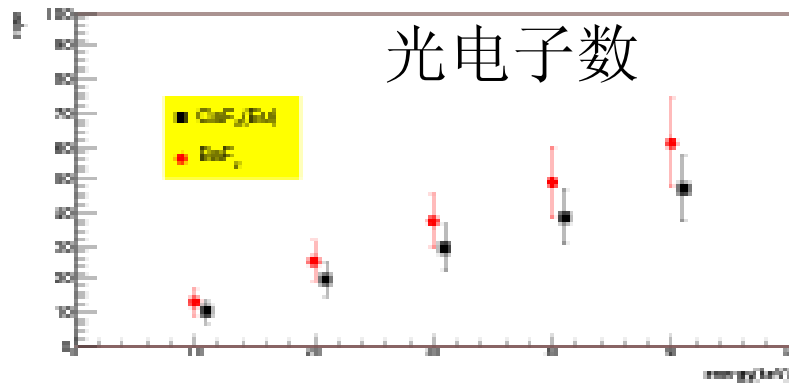


本973项目为一个单元的探测器  
性能研究

## 2.2 探测器模拟

GEANT4

preliminary



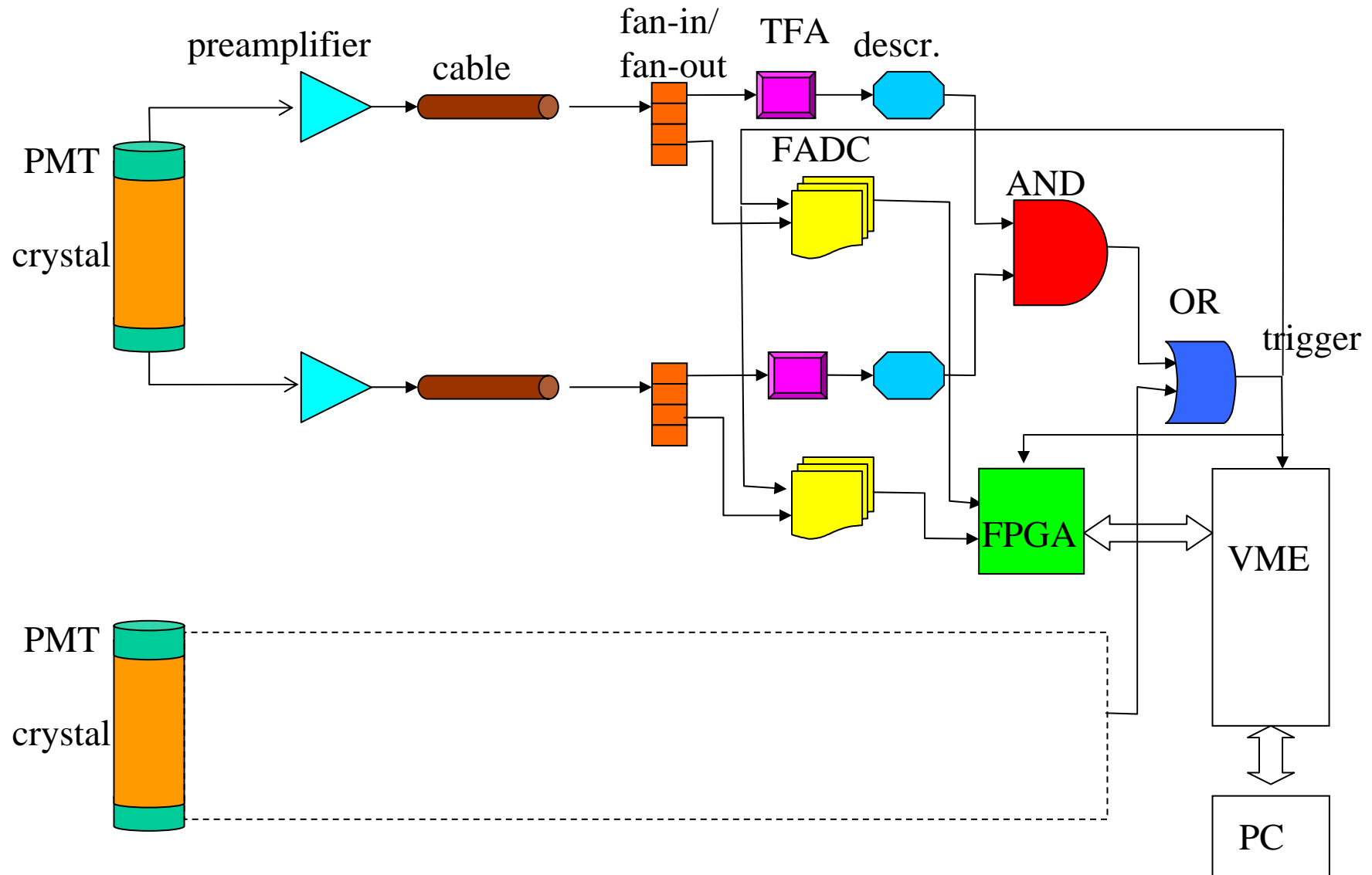
模拟初步显示：

- **CaF<sub>2</sub>(Eu)厚度为6”**，**BaF<sub>2</sub>长度为10”**时，可达到较高的信号幅度，较好的能量分辨，较高的探测效率，较好的事例纯度,各项指标得以优化。
- 体量（直径、长度）越大，事例率越高，**直径5”**比较好

一个单元，总重**37.6kg**：

- CaF<sub>2</sub>(Eu) 6.2kg,
- BaF<sub>2</sub> 15.7kg × 2 = 31.4kg。

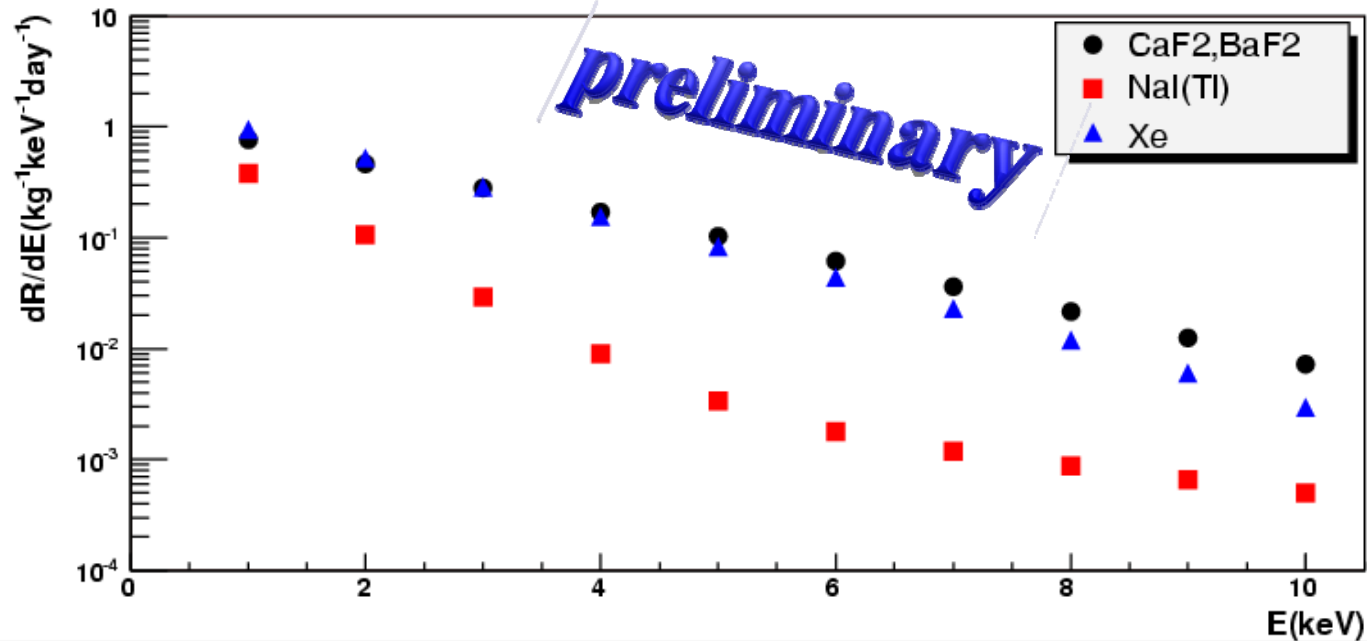
## 2.3 电子学设计





## 2.4预期结果

### 事例率, SI



$$m_W = 60 \text{ GeV}/c^2,$$

$$\xi \sigma_{\text{SI}} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ pb},$$

$$v_0 = 220 \text{ km/s},$$

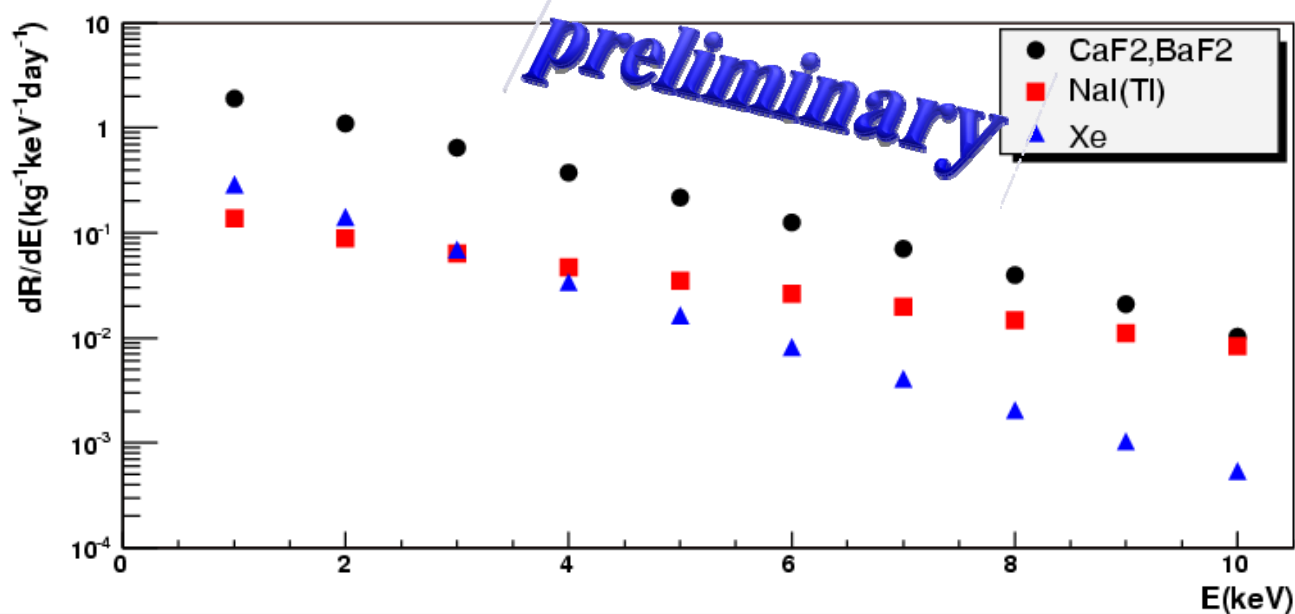
$$v_{\text{esc}} = 550 \text{ km/s},$$

$$\rho_0 = 0.3 \text{ GeV}/c^2/\text{cm}^3$$

等效电子能量

CaF2(Eu)+BaF2在0-10keV内的SI事例率与LXe相当

# 事例率, SD

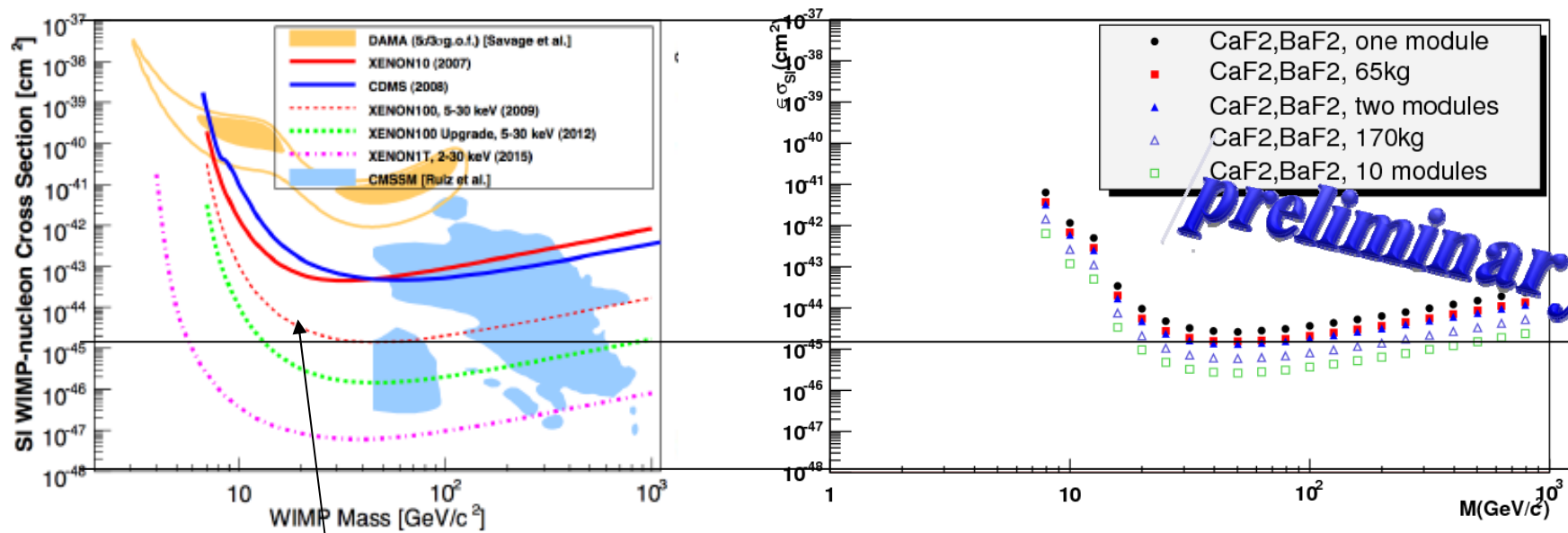


$m_W=60\text{GeV}/c^2,$   
 $\xi \sigma_{SD}=5\text{pb},$   
 $v_0=220\text{km/s},$   
 $v_{\text{esc}}=550\text{km/s},$   
 $\rho_0=0.3\text{GeV}/c^2/\text{cm}^3$

等效电子能量

CaF2(Eu)+BaF2在0-10keV内的  
SD事例率高出LXe一个数量级

# 灵敏度, SI

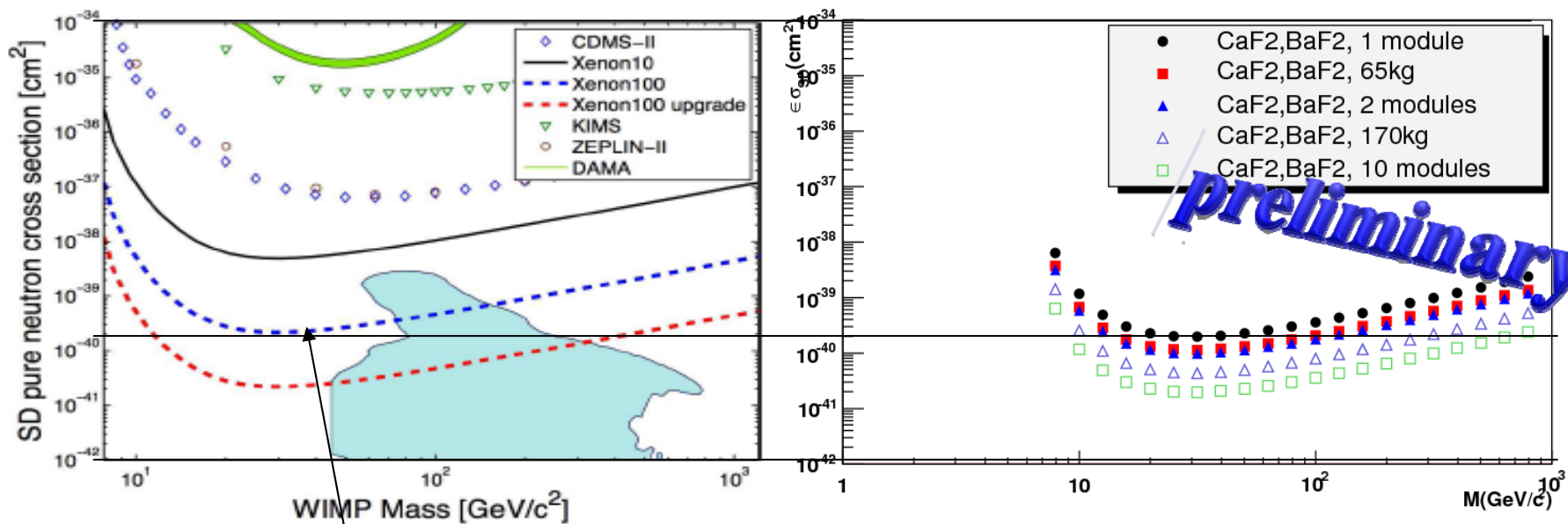


XENON100:  
65kg(170kg), 92.3days

CaF<sub>2</sub>(Eu) + BaF<sub>2</sub>:  
92.3days

在同样的有效质量、观测时间、理论参数下，CaF<sub>2</sub>(Eu)+BaF<sub>2</sub>的SI灵敏度与LXe相当

# 灵敏度, SD



XENON100:  
65kg(170kg), 92.3days

CaF2(Eu)+BaF2  
92.3days

在同样的有效质量、观测时间、理论参数下，CaF2(Eu)+BaF2的SD灵敏度约是LXe的两  
位。

## 2.5 探测器调研

PMT: 带石英窗, 低放射性本底, Electronic Tube Inc.

晶体: 低的放射性本底, Saint Gobain为DAMA制作

NaI(Tl)可做到ppt量级, 因此做到低放射性技术上没有问题, 关键在于经费

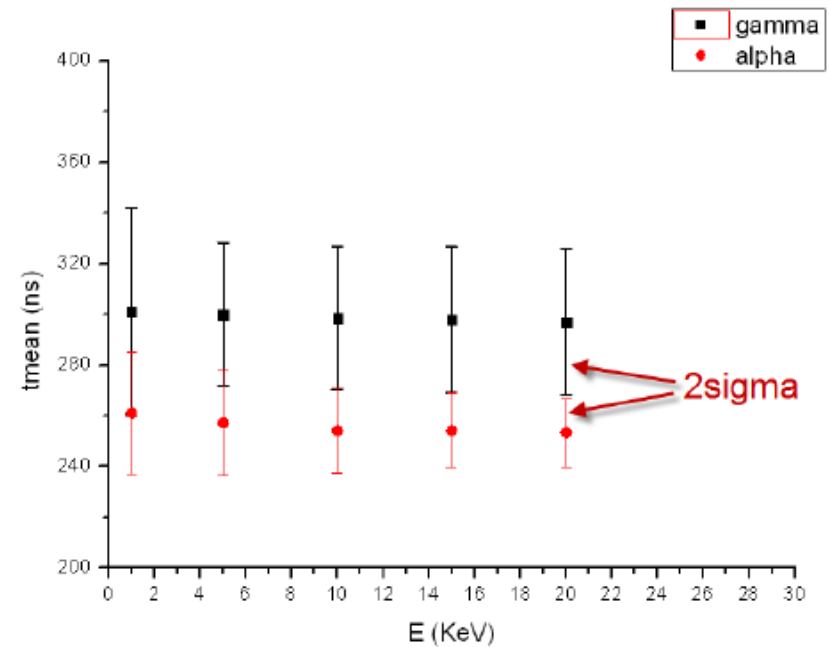
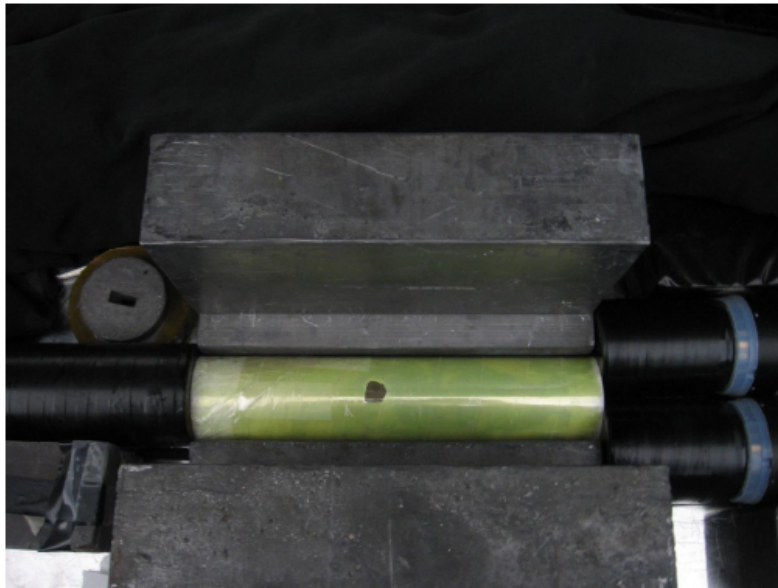
电子学: 低噪音, 线形好, CAEN

Qualification of NaI(Tl)	K (ppb)	U (ppt)	Th (ppt)	Method of production
Standard	2000	< 500	< 500	Bridgman standard growth
Low Background	< 500	< 500	< 500	K Selected batches Bridgman growth
Very Low Background	< 100	< 50	< 50	K, U+Th Selected batches (CL, BL) + Kyropoulos growth
Ultra Low Background (project Gran Sasso)	<< 40	< 5	< 5	Purified raw materials NaI and TlI + Crafted Kyropoulos growth + Handling protocol

Saint-Gobain  
CRYSTALS

# CsI(Na)的alpha/gamma分辨

Φ44x200mm圆柱晶体



CsI(Na)测试 (吕军光)

# 其他问题

- 屏蔽：铜+铅+镉+石蜡+混凝土
- 标定： $\gamma$ （放射源）， $n$ （质子束）
- 模拟：进一步的工作，时变波形，中子源，放射性本底等

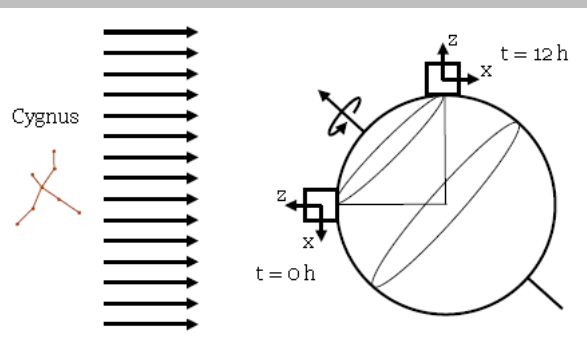
## 2.6 预算

- 1个单元 (37.6kg)

- 研究探测器性能：用一般较好的晶体，不包括屏蔽，标定等，预计约180万元；
- 实际探测暗物质：用低本底的晶体，不包括屏蔽，标定等，预计约340万元。



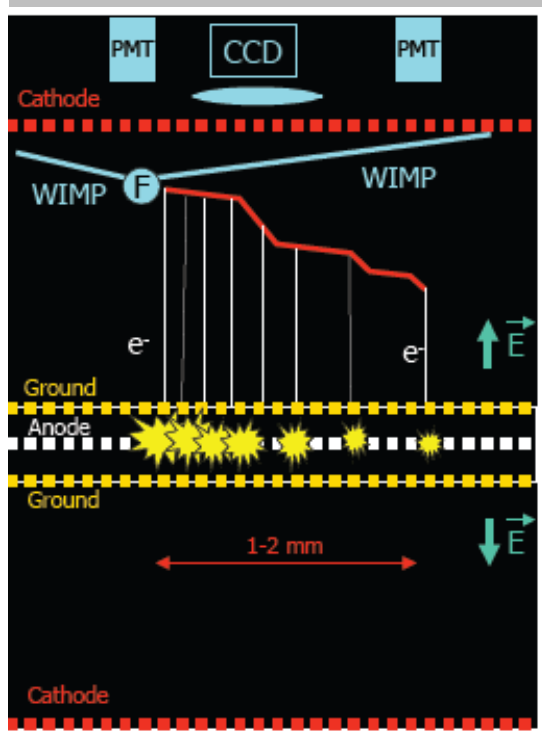
# 展望：下一代的暗物质探测的根本出路在于方向性探测器



一旦探测器达到吨年级，相互作用截面  $\sigma$  小于  $10^{-45} \text{cm}^2$ ，即使本底降到  $10^{-3} \text{cpd/kg/keV}$ ，任何非方向性探测器（几乎现在所有实验所用的探测器）都很难观测到暗物质。根本的出路在于启用**方向性探测器**，因其可测核反冲方向、径迹和射程，通过观测**日调制**，把WIMP的核反冲与**本底中子**的核反冲区分开。

- 日调制幅度可高达90%（比较年调制 $<7\%$ ）。
- 所有的本底都是各向同性的。
- 能甄别  $x$ 、GAMMA  $10^6$ 倍，甄别中子近 $10^3$ 倍。
- 只需要 $O(10)$  事例就可以确定暗物质的存在。

我们一直在调研方向性探测器，并一再呼吁要重视，早点研发。



# 总结

CaF<sub>2</sub> (Eu) /BaF<sub>2</sub>复合晶体阵列将以高灵敏度直接观测暗物质年调制，既侧重自旋相关的观测，又兼顾自旋无关的观测，将从另一个角度确定暗物质的存在，又将检验DAMA的结果。本项目对该晶体阵列中的一个单元进行了方案设计，将进行研制和性能测试，它将为未来的复合晶体阵列研制提供依据。

同时，我们也在调研方向性的探测器，因为它未来暗物质探测唯一有效的探测器。