

新型“CaF₂(Eu) + 液闪”复合 WIMP 探测器的实验研究*

盛祥东 戴长江 何会林

(中国科学院高能物理研究所, 宇宙线与高能天体物理开放实验室 北京 100039)

摘要 介绍北京组新近提出的“CaF₂(Eu) + 液闪”复合 WIMP 探测器的设计特点. 通过对探测器单元内部光收集效率的研究, 初步确定了复合探测器的设计结构. 另外, 对探测器内部放射性杂质衰变在复合探测器单元中形成的本底情况进行模拟, 结果表明了复合探测器具有良好的排除本底的能力.

关键词 新型复合探测器 光收集效率 氟化钙晶体 载钷液体闪烁体

1 引言

寻找冷暗物质粒子候选者——WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) 是当前粒子物理领域的重要课题, 目前, 世界上已有多个实验组正在进行这方面的实验观测, 并得到了初步的实验结果^[1-3]. 与此同时, 北京组提出新的 WIMP 实验观测方案^[6], 即采用 250kg CaF₂(Eu) 晶体和快闪烁体 (如液体闪烁体、硅酸钆 (Gd₂SiO₅, 简称为 GSO)、铝酸钇 (YAP) 等) 构成新型复合探测器来探测 WIMP. 本文中主要讨论的是 CaF₂(Eu) 晶体和液体闪烁体构成的复合探测器的特点.

在新型复合探测器中, CaF₂(Eu) 晶体是探测 WIMP 的主探测器. 这时, 整个复合探测器的能量分辨特性将主要决定于 CaF₂(Eu) 晶体的发光效率和探测器单元内部的光收集效率. 北京组在 CaF₂(Eu) 晶体的研制方面已取得了很好的进展, 获得的 CaF₂(Eu) 晶体的能量分辨率较高. 在探测器单元内部, 获得好的光收集效率可以通过选择适当的探测器单元结构、CaF₂(Eu) 晶体尺寸和晶体数目来实现.

由于 CaF₂(Eu) 晶体属于慢闪烁体 (它的发光衰减时间约为 900ns), 在该晶体上产生的能量沉积将形成慢信号, 而液体闪烁体的光衰减时间仅为几个 ns 到十几 ns, 属于快闪烁体, 记录的事例信号为快信号. 实验上将利用这一特点和脉冲波形分析的方法有效地区分本底和 WIMP 作用事例.

2001-07-20 收稿

* 国家自然科学基金(19875060)资助

2 CaF₂(Eu)晶体、载钆液闪的材料性能

在意大利 Gran Sasso 国家低本底实验室,中意合作 DAMA 组对 Bicron 公司生产的 3 块 CaF₂(Eu)晶体($\phi 7.62\text{cm} \times 2.54\text{cm}$)样品的性能进行了测试. 图 1 为实验装置示意图. 将 ²⁴¹Am 源分别置于标号为 1, 2, 3 的 CaF₂(Eu)晶体上, 得到的能谱如图 2 所示. 结果表明, CaF₂(Eu)晶体的能量分辨率为 $\sigma/E = 14.7\%$. 根据晶体所在位置不同引起的 60keV γ 全能峰位的变化特点, 还可以得到这类 CaF₂(Eu)晶体的光衰减长度好于 30cm.

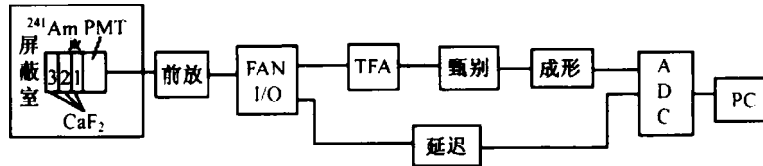


图 1 CaF₂(Eu)晶体低本底能谱测量示意图

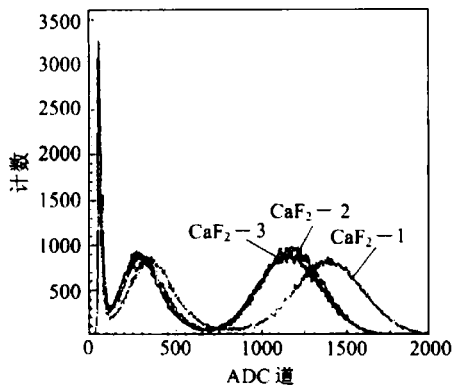


图 2 CaF₂(Eu)晶体(Bicron公司)的

²⁴¹Am γ (60keV)能谱

北京组同北京玻璃研究所合作研制成功的国产 CaF₂(Eu)晶体的光输出约为 NaI(Tl)晶体的 50%，闪烁衰减时间为 900ns。实验上,北京组用 ²⁴¹Am (γ , 60keV)放射源对所研制的 CaF₂(Eu)样品($\phi 2.7\text{cm} \times 2.3\text{cm}$, 重量为 43.8g, 掺 Eu 浓度为 0.25%)进行了能量分辨特性测试, 结果给出 CaF₂(Eu)的能量分辨率为 $\sigma/E = 23.1\%$ 。另外, 在 Gran Sasso 低本底实验室利用 HP Ge 探测器对国产 CaF₂(Eu)晶体(未经提纯)进行放射性杂质含量的测试, 结果如图 3 和表 1 所示。

鉴于实验上要求 CaF₂(Eu)晶体中的放射性杂质 ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K 等的含量在 10^{-11}g/g , 北京组将与北京湿化研究院合作, 采用湿冶法工艺, 对生产 CaF₂(Eu)晶体的原材料进行提纯, 估计可得更好的结果。

表 1 CaF₂(Eu)晶体样品的放射性纯度

晶体内放射性杂质	含量/ppb	晶体内放射性杂质	含量/ppb
²³² Th	51 ± 16	^{nat} K	$< 26 \times 10^3$
²³⁸ U	86 ± 40	²¹⁴ Bi	10 ± 3
⁴⁰ K	< 3.06	⁶⁰ Co	8.67×10^{-10}

北京组与北京核仪器厂合作已成功获得了 600ml 载 Gd 浓度为 3% 的液体闪烁体. 实验上, 用 ²⁴¹Am 对载 Gd 3% 600ml 的液体闪烁体的能量分辨特性以及光衰减长度进行

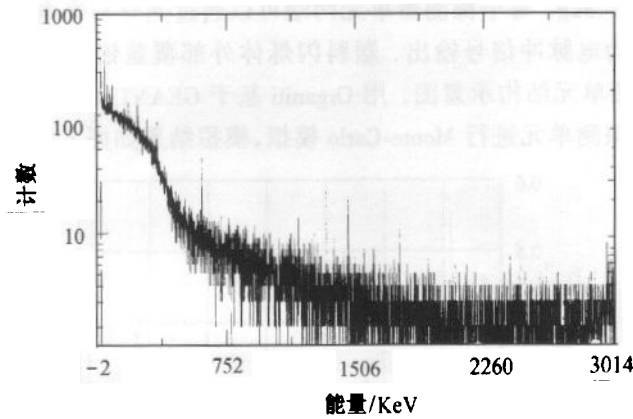


图3 CaF₂(Eu)晶体的低本底测试能谱

测试. 结果表明^[7], 载 Gd 3% 的液闪对 60keV 的 γ 的能量分辨率可达 53%, 它的光衰减长度为 150cm, 见图 4.

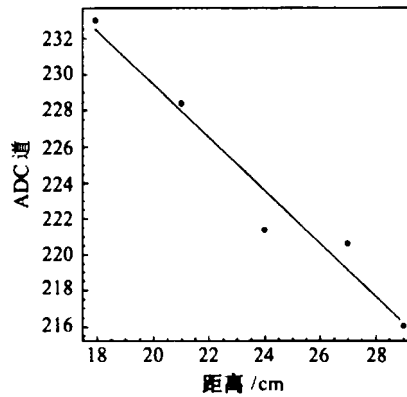


图4 载 Gd 液闪光衰减性能测试

3 新型复合探测器单元结构及光传输特性

复合探测器单元的初步设计为圆柱型结构, 盛装 CaF₂ 晶体及液闪的塑料闪烁体容器的厚度(指侧面以及两端的尺寸)为 1cm, 内径为 8cm, 外径为 10cm, 长度为 42cm. 每一个探测器单元将包含 11 块尺寸为 $\phi 5.26\text{cm} \times 2.54\text{cm}$ 的 CaF₂(Eu) 晶体, 它们均等间距(1cm)浸在液体闪烁体(盛在圆柱型塑料闪烁体容器中)中, 这样每个探测器单元中 CaF₂(Eu) 晶体的总质量将达到 1.93kg, 液体

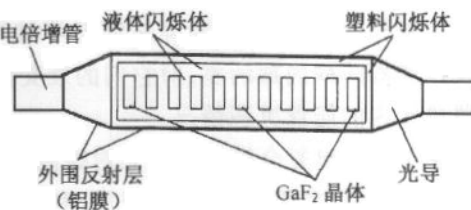


图5 复合探测器单元结构示意图

闪烁体的质量约为 1.5kg. 每个探测器单元两端可以通过光导与光电倍增管耦合相接, 将事例产生信号转换为电脉冲信号输出. 塑料闪烁体外部覆盖铝膜反射层, 以增加光收集效率. 图 5 为探测器单元结构示意图. 用 Organiti 基于 GEANT3 编写的模拟光传输特性的原程序对这种复合探测单元进行 Monte-Carlo 模拟, 模拟结果如图 6 所示.

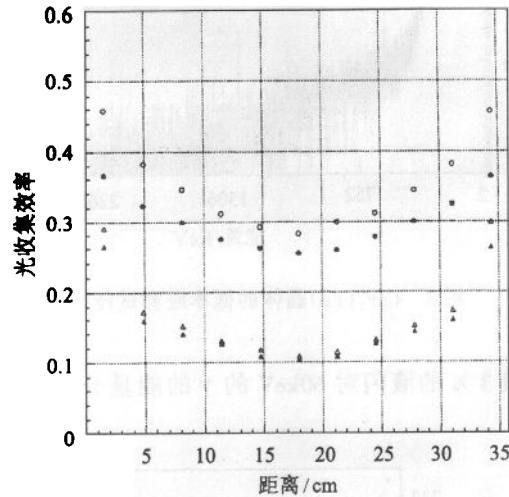


图 6 新型复合探测器单元对内部 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 晶体上发出的荧光的光收集情况

横坐标表示 11 块 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 晶体在液体闪烁体中的相对位置.

- ▲有光导与光电倍增管耦合, 外围没有反射的情况; △直接与光电倍增管耦合, 外围没有反射层的情况;
- 通过光导与光电倍增管耦合, 外围有反射层的情况; ○直接与光电倍增管耦合, 外围有反射层的情况.

根据模拟计算结果, 新型复合探测器的光收集效率总的平均值可达 30%, 最小值为 25.5%. 对于能量沉积为 2keV 的信号来说, 探测器单元两端的光电倍增管光阴极上平均收集大约 12 个光子, 这样对于量子效率达到 30% 的光电倍增管来说, 平均将产生 3.6 个光电子. 对于工作在单光电子状态的低噪音数据采集系统而言, 这一结果标志着新型“ $\text{CaF}_2(\text{Eu}) + \text{液闪}$ ”复合探测器阈能可以达到 2keV, 从而达到 WIMP 实验观测的要求.

4 新型“ $\text{CaF}_2(\text{Eu}) + \text{液闪}$ ”复合探测器本底的研究

新型复合探测器单元以及实验上对探测阵列中的各种材料内部放射性杂质的要求见图 5 和表 2. 具体地, 考虑探测器单元内部的 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 晶体、液体闪烁体、塑料闪烁体以及相连的光导、光电倍增管和屏蔽铜壳等材料内部所含的 ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 等放射性杂质以及探测器阵列内部的氡, 对它们的衰变粒子进行了模拟跟踪, 记录一天中它们在复合探测器单元内的能量沉积情况.

图 7 显示出复合探测器单元对探测器内部所有放射性衰变引起的本底的排除能力. 结果表明, 在阈能为 1keV 的情况下, 利用复合探测器单元内部的液体闪烁体、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 晶体上的快、慢信号的脉冲波形的差异, 可以有效地排除近 45% 的来自 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 本身的本底.

射性杂质形成的本底. 根据上面的模拟结果,在低能区(1—20keV),复合探测器单元的本底计数将达到 2.5cpd/kgkeV,这里,本底计数的主要贡献来自光电倍增管、光导以及外部铜屏蔽层的放射性杂质衰变.

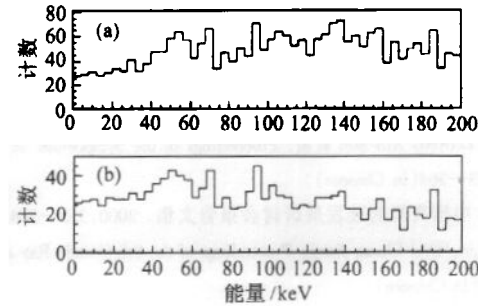


图7 模拟阵列中所有放射性衰变在一个探测器单元中的能谱

(a) 在 CaF₂(Eu)晶体、液体闪烁体中都有能量沉积;

(b) 只在 CaF₂(Eu)晶体中有能量沉积.

表2 探测材料放射性杂质的实验要求

	放射性杂质含量
CaF ₂ (Eu)	U/Th < 10 ⁻¹¹ , K < 10 ⁻¹² g/g
载 Gd 液闪	U/Th < 10 ⁻¹² , K < 10 ⁻¹² g/g
塑料闪烁体	U/Th < 10 ⁻¹² , K < 10 ⁻¹² g/g
光电倍增管	U/Th < 30ppb, ^{nat} K < 60ppm
光导	²³⁸ U < 1ppb, ²³² Th < 2ppb, ^{nat} K < 1.3ppm
屏蔽铜室	²³⁸ U < 0.5ppb, ²³² Th < 8ppb, ^{nat} K < 0.6ppm
氧	4Bq/m ³

5 结论

通过对新型“CaF₂(Eu) + 液闪”复合 WIMP 探测器设计结构和材料性能的讨论,可以看出,CaF₂(Eu)晶体具有良好的能量分辨率;载钆液体闪烁体有良好的光衰减长度;新型复合探测器单元可以保证有较好的光收集效率,能够达到 WIMP 观测实验的要求. 复合探测器还可以较好地排除探测器阵列内部放射性杂质衰变形成的本底,从而进一步提高实验上选取 WIMP 有效作用事例的能力.

参考文献 (References)

- 1 Bernabei R et al. Phys. Lett., 2000, **B480**:23—31
- 2 Bernabei R et al. INFN/AE - 98/23, 1998
- 3 Abusaidi R et al. ar Xiv: astro-ph/0002471, Mar 2000, 21
- 4 Fushimi K et al. Nucl. Phys. (Proc. Suppl.), 1994, **B35**:400—402
- 5 Spooner N J C et al. Nucl. Phys. (Proc. Suppl.), 1996, **B48**:64—66
- 6 DAI Chang-Jiang, MA Ji-Mao, ZHANG Xin-Min et al. Proceedings of the Symposium on the Development Strategy of Chinese High Energy Physics. 2000, 353—364 (in Chinese)
(戴长江, 马基茂, 张新民等. 中国高能物理发展研讨会报告文集. 2000, 353—364)
- 7 SHENG Xiang-Dong, HE Hui-Lin, DAI Chang-Jiang. Proceedings of the 8th Cosmic Ray and High Energy Astrophysics Conference. Xiamen, 1999, 99—104 (in Chinese)
(盛祥东, 何会林, 戴长江. 第八届全国宇宙线和高能天体物理学术会议文集. 厦门, 1999, 99—104)

Experimental Research on the New “CaF₂(Eu) + Liquid Scintillator” Mixed WIMP Detector*

SHENG Xiang-Dong DAI Chang-Jiang HE Hui-Lin

(Key Laboratory of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, Institute of High Energy Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The characters of a kind of new detector, “CaF₂(Eu) + liquid scintillator” mixed WIMP detector, which is proposed by Beijing Group, are introduced. The preliminary design of the structure of this detector has been made, by studying its optical collection efficiency with simulation. In addition, it shows that the mixed detector would be good at excluding the backgrounds, which are produced by the decays of the radioactive contamination inside the detector.

Key words new mixed detector, optical collection efficiency, CaF₂ crystal, Gd loaded liquid scintillator

Received 20 July 2001

* Supported by NSFC(19875060)