

新型太阳中微子闪烁探测器的研制*

戴长江¹⁾ 何会林 叶子飘 盛祥东

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心 北京 100039)

摘要 概述了一种新型太阳中微子闪烁探测器的研制,其中载钆(Gd)液体闪烁体的 Gd 浓度达到5%、光的衰减长度 $\geq 150\text{cm}$ 、对60keV的Gamma-ray之能量分辨率为21%(σ);直径1cm、厚3cm的GSO:Ce晶体,其发光产额约为NaI(Tl)晶体的20%、光的衰减时间为60ns、对662keV Gamma-ray之能量分辨率为9.2%(σ)。文章讨论了由这两种闪烁体构成的复合探测器的特点及作为太阳中微子探测器其本底的降低措施。对直径10cm、厚50cm的这种复合探测器的模拟计算表明其光的收集效率可达20%。

关键词 太阳中微子探测器 复合探测器 载钆液体闪烁体 GSO 晶体

1 引言

1968年R. Davis等人首次公布了太阳中微子流强的观测值仅为太阳标准模型(SSM)预期值的三分之一^[1],从此它就成为三十多年来人们极为关注的太阳中微子丢失问题,由于它涉及到天体物理、核物理、粒子物理、宇宙学以及中微子基本性质等最基本的问题,而且其结果又被后来的太阳中微子实验所证实,R. Davis荣幸地分享了2002年诺贝尔物理学奖。该实验采用了615吨四氯乙烯(C_2Cl_4 ,其中的Cl为靶核),以放射化学的方法,在美国Homestake观测 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子。此方法属于非实时的,不能测太阳中微子能谱,只能测其流强。之后的两个实验GALLEX和SAGE分别采用了30吨和50吨的镓(Ga),也是采用放射化学的方法探测太阳中微子(PP, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$)。他们的观测结果分别为SSM预期值的0.60^[2]和0.55^[3],证实了太阳中微子的丢失。后来的Kamiokand及其升级型的Superkamiokand(SK)分别采用680吨和22500吨水切仑柯夫探测器测量了 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子的能谱及其流强,其测量值仅为SSM的0.46^[4]。再次证实了太阳中微子的丢失。为解释太阳中微子为何丢失,全面分析了Homestake, GALLEX, SAGE和SK4个实验的数据,经最佳拟合,

初步发现:① ${}^7\text{Be}$ 中微子流强为零,或②太阳中微子可能发生振荡(或称味的改变),而且有多个振荡解:大混合角(LMA)、小混合角(SMA)、低质量(LOW)和真空解(VAC)。为探索 ${}^7\text{Be}$ +PP中微子所蕴含的新物理,为确定太阳中微子的振荡解,要求实验能实时测出太阳中微子的全能谱,特别是含有占主要成分的PP, ${}^7\text{Be}$ 中微子能谱。如上述,采用放射化学法的Homestake, GALLEX和SAGE不可能测出太阳中微子能谱,而SK及SNO也仅能测出 ${}^8\text{B}$ 中微子能谱,因它们的阈能 $\geq 5\text{MeV}$,对PP, ${}^7\text{Be}$ 中微子不灵敏。因此,当务之急是开发新型的太阳中微子探测器。1998年R. S. Raghavan等人成立了LENCSE(后改为LENS)合作组,开始开发载钆液体闪烁体。与此同时我们也进行了载钆(Gd)液体闪烁体的预研。2000年,在载钆液体闪烁体预研的基础上,在中国科学院高能物理所的高能物理战略研讨会上,我们提出了研制“新型太阳中微子探测器”的建议^[5],其目的是要测出太阳中微子的全能谱。

2002年,采用1000吨重水实时观测 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子的SNO^[6]公布了两个重要的结果:①中性流的事例率与SSM的预期值一致,从而验证了SSM。②电荷流的事例率仅为SSM预期值的0.347,证明太阳中微子发生振荡,并以 2.5σ 确定了LMA振荡解

2003-08-19收稿,2003-11-20收修改稿

* 国家自然科学基金(10075058)资助

1) E-mail: daicj@mail.ihep.ac.cn

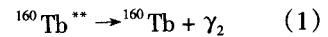
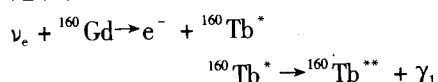
(但参量值的范围较大),基本上排除了LOW和SMA解,但不能排除VAC解.2002年底,KamLAND的反应堆中微子振荡实验获得首次的结果^[7],在假设CPT守恒、以及反中微子振荡实验的结果对太阳中微子仍适用的前提下,KamLAND首次结果对太阳中微子振荡解的贡献在于^[8]:进一步确定LMA振荡解(参量值的范围有所缩小),基本上排除了VAC,LOW和SMA等解.然而,太阳中微子的问题至今尚未得到最终的解决.为探索⁷Be+PP中微子所蕴含的新物理,为精确地确定太阳中微子振荡解(如LMA),仍然要求实验能实时测出太阳中微子的全能谱,这依然要求采用新型的太阳中微子探测器.尽管KamLAND和BOREXINO^[9]也能测量太阳中微子的全能谱,但这两个实验只能测 ν_e -e散射事例,不能测电荷流事例,难以获得与模型无关的实验结果.另一方面,它们也还有如何达到低本底的问题.最有希望的是新型的探测系统如LENS^[10](原计划载镱液体闪烁体,后改为载铟液体闪烁体)和新型的载钆复合探测器,因为它们既可测量散射事例又可测量电荷流事例.在这两种新型的探测器中,载钆复合探测器有更明显的优势:①载钆浓度可高达70%(LENS载铟浓度仅10%),因而具有同量靶物质的探测器体积可缩小,有利于采用主动式的屏蔽,进一步降低本底.②更易去除(或降低)探测器本身内部的放射性杂质,从而更易达到低本底(参见第3节).总之,在将来的太阳中微子实验中,载钆复合探测器的前景是诱人的.

2 新型的载钆(Gd)复合闪烁探测器

本载钆复合闪烁探测器由载Gd液体闪烁体和小块GSO:Ce晶体或碎晶组成,具有载Gd浓度高(可高达70%以上)、易做成大规模、好的性能价格比、易达到低本底等优点,因而很适合于将来新的太阳中微子实时观测实验.下面将着重讨论:其探测原理,各主要成分的研制及其性能,复合探测器的光收集效率以及降低本底的措施.

2.1 探测原理

1997年R.S.Raghavan^[11]提出利用¹⁶⁰Gd的逆beta衰变过程有可能实时测量太阳中微子.其反应过程如下:



子核¹⁶⁰Tb第一激发态“*”能级为139keV,第二激发态“**”能级为64keV,半寿命为86ns.显然, e^- 和 γ_1 ($E_{\gamma_1} = 75\text{keV}$)是瞬时的,而 γ_2 ($E_{\gamma_2} = 64\text{keV}$)将延迟86ns.所以,用($e^- + \gamma_1$)和 γ_2 的延迟符合提取信号,将可大幅度地降低本底.如果电子的动能为 E_e ,相对于激发态“*”的阈能为 E_{th} (245keV),那么中微子 ν_e 的能量 E_{ν} 为

$$E_{\nu} = E_e + E_{th} \quad (2)$$

因此,通过 E_e 的延迟符合测量,就可获得太阳中微子的能谱.按T.Yamanaka et al^[12]所测的跃迁强度 $B(\text{GT}) = 0.052$,估计20吨的自然Gd每天可测到一个太阳中微子事例.如此之低的事例率,要求大幅度地降低本底,这需从探测器本身及其环境以及测量技术上采取降低本底的措施,请见后面的讨论.

2.2 载钆液体闪烁体

载钆液体闪烁体作为太阳中微子探测器,要求它应具有较高载钆浓度、易做成大规模、较长的光衰减长度(>150cm)、较好的能量分辨率以及性能稳定和低的本底等.按照这些要求,其研制方法主要有:

(1)采用强溶剂把钆溶于液体闪烁体之中,此溶剂属于极性的溶液.这种方法较易达到较高的浓度,但由于溶液对闪烁荧光有较强的吸收,导致光的衰减长度缩短.曾试过某些溶剂,较长的光衰减长度只有25cm.所以此法之关键是寻找合适的强溶剂.

(2)络合法:即采用表面活性剂把极性的钆溶液与非极性的有机闪烁液体络合在一起.此法易达到合适的载钆浓度(>5%)和较长的光衰减长度.但关键是要有好的表面活性剂.

(3)把钆制成有机盐,之后把其溶入有机闪烁液体中.

我们采用的是第三种方法^[13],其是国际通行的作法,在此仅做简要说明:把 Gd_2O_3 制成 $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$,进而制成有机盐 $\text{Gd}(\text{EH})_3$,最后把其溶入基于甲苯的液体闪烁体中,先后制成载Gd浓度3%,5%的液体闪烁体,对直径5cm,长度30cm的载Gd浓度5%的液体闪烁体的性能进行了测试,其结果如下:

a)能量分辨率:用²⁴¹Am Gamma-ray(60keV)源做通常的能谱测试,结果如图1所示,其能量分辨率达到21%(σ).

b)光的衰减长度:仍用²⁴¹Am源和准直器,测

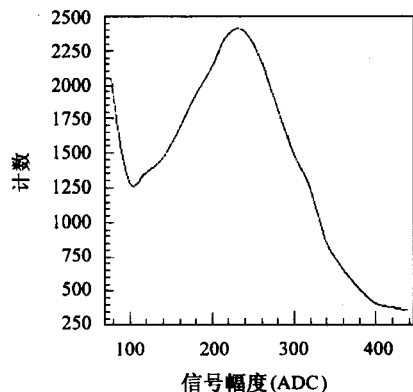


图 1 载 Gd 浓度 5% 的液闪的 60keV 能谱

量在探测器的不同位置的光电峰位的变化. 结果如图 2 所示. 其光的衰减长度 $\geq 150\text{cm}$.

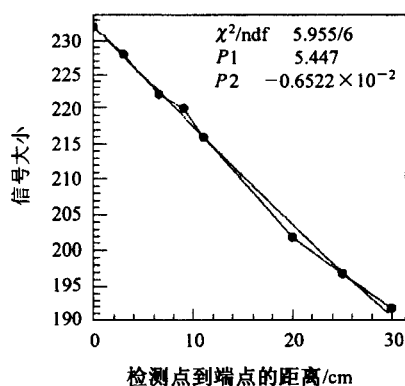


图 2 光衰减长度拟合曲线, $P2$ 为衰减长度的倒数

这些性能基本达到由载 Gd 液闪和 GSO 小块晶体构成的复合探测器的要求. 如果单独作为太阳中微子探测器, 其载 Gd 浓度有待于进一步提高, 如达到 10%.

关于液体闪烁体的稳定性: 液闪放置 6 个月后, 在相同的测量条件 (相同的 ^{241}Am 源位置、高压、放大倍数等) 下, 观测其光电峰峰位和能量分辨率, 均未发现变化. 更长时间的稳定性有待于进一步观测.

2.3 GSO:Ce 闪烁晶体

GSO:Ce(Gd_2SiO_5 :Ce) 晶体是 80 年代新开发的一种新型的 Gamma-ray 闪烁探测器, 它的主要性能: 高密度 ($6.71\text{g}/\text{cm}^3$), 短的辐射长度 (1.38cm), 短的光衰减时间 (30ns), 较高的荧光产额 (NaI(Tl) 的 20%), 发射光谱 $410\text{--}520\text{nm}$, 光折射系数 1.85, 不潮解. 其主要成分钆 (占 75%) 对 neutron 有大的作用截面, 因而也是一种理想的中子探测器. 自然钆中有 22% 的 ^{160}Gd , 所以 GSO:Ce 晶体是一种很有前途

的太阳中微子探测器. GSO 晶体的熔点很高 (千度 C 以上), 拉制此晶体时需用高温的晶体炉和耐高温、耐腐蚀的坩埚, 因此生产 GSO 晶体的费用高, 导致其价格昂贵. 特别是大块的 GSO 晶体, 不仅制作困难, 其价格更为昂贵, 这是限制 GSO 晶体被广泛应用的瓶颈.

我们的合作者“北京深鸣远科技开发中心”已成功地研制了多块的 GSO:Ce 晶体, 对其中的一块直径为 1cm , 长 3cm 的晶体进行性能测试, 结果如下:

(1) 能量分辨率: 以 ^{137}Cs Gamma-ray (662keV) 源进行能谱测量, 结果见图 3. 其能量分辨率达到 9.2% (σ).

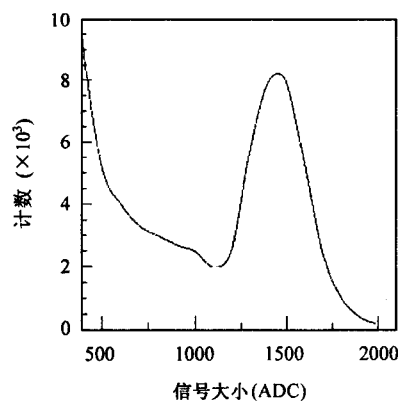


图 3 GSO 晶体的 ^{137}Cs 能谱

(2) 相对的荧光产额约为 NaI(Tl) 晶体的 20%.

(3) 光的衰减时间约为 60ns . 如前所述, 作为太阳中微子探测器, 由于采用延迟符合法 (符合时间 $\sim 100\text{ns}$) 提取信号、抑制本底. 按此光衰减时间计算, 在 100ns 符合时间内所获取的光子数占 81%, 基本上达到要求, 但不太理想, 希望 GSO 晶体的光衰减时间尽量短, 如 30ns 左右. 因此该开发中心将采用改变激活剂 Ce 浓度的措施进一步改进 GSO 晶体的光衰减时间.

2.4 复合载 Gd 闪烁探测器

已研制的载 Gd 液体闪烁体, 载 Gd 浓度已达 5%, 光的衰减长度 $\geq 150\text{cm}$, 易做成大规模, 这些有利于做成太阳中微子探测器. 但单独作为太阳中微子探测器, 其载 Gd 浓度还需提高, 如高于 10%. 但高浓度的载 Gd 液体闪烁体, 光的衰减长度将缩短, 或不易达到 150cm , 而且其稳定性将变差, 这些是它的不足之处. 如前述, GSO 晶体具有高密度、高 Gd 含量、高的光产额、好的能量分辨率和时间分辨, 是一种很有前途的太阳中微子探测器, 但需要规模大,

即需大量的大块 GSO 晶体,这在技术上和经济上都有难处. 由载 Gd 5% 的液闪和小块 GSO 晶体或碎晶所构成的复合载 Gd 探测器既可取其两者的长处,又可避免两者的短处,它可以做成高 Gd 浓度(70% 以上)的复合闪烁体,易做成大规模,且性能稳定,并具有好的能量分辨和时间分辨,很适合于采用主动屏蔽和被动屏蔽,易达到低本底.

载 Gd 5% 液体闪烁体的光折射系数约为 1.5, GSO:Ce 晶体的光折射系数为 1.85,两者混合,不太影响闪烁荧光的收集. 为探索荧光的收集效率,对直径 10cm,长 50cm 的复合探测器模块进行模拟计算. 设该模块用直径 10cm,长 50cm 的石英管做容器,管内由小块的 GSO 晶体填满,晶体间的间隙到管内壁由载 Gd 5% 的液体闪烁体补满,此液闪既做闪烁体又做光导. 管外壁用 teflon 作反射层. 管的两个端面作为光收集的两个窗口. 模拟时,考虑了光在晶体和液闪内部的传输与被吸收的过程,以及光在介质界面(不同的闪烁体之间及闪烁体与管壁之间)的反射与透射. 模拟结果表明,此模块的荧光收集效率可达 20%. 当然,还需实验验证¹⁾.

关于液闪与晶体之间的稳定性:GSO 晶体不潮解,性能稳定,不易与液闪的有机溶剂发生化学反应. 液闪的有机溶剂有多种可供选择,如矿物油、甲苯和二甲苯等,特别是如 MACRO 实验所用过的那种矿物油,已被证明其具有很好的稳定性,不易与容器壁发生化学反应. 将来的复合探测器中的液闪可选择这类溶剂,确保复合探测器的长期稳定性.

3 降低本底的措施

尽管 ^{160}Gd 对太阳中微子的作用截面相对地较高,但如前述,它的事例率仍很低,如含 20 吨 Gd 的复合探测器每天只能测到一个太阳中微子事例. 因此作为太阳中微子探测系统的载 Gd 复合探测器,降低其本底是至关重要的. 本底可分为来自探测器内部的和外部的,不同的本底来源,所采用的降低本底的措施也不同. 对于外部本底,其措施是进山洞或下矿井,利用较厚覆盖层的岩石($> 500\text{m}$)吸收宇宙线(主要是 μ 子),再采用被动屏蔽(如铅 + 铜 + 镉)和主动屏蔽(如塑料闪烁体作 veto)等措施屏蔽来自环境的 χ , γ 和中子,进一步降低来自外部的本底. 对于来自探测器本身的内部本底,主要有二类放射性杂质:

(1) U/Th 系列如 ^{238}U , ^{232}Th 等,去除 U/Th 的措施是对探测器的原材料进行多次的化学-物理处理,争取达到放射性纯度:U/Th 含量 $< 10^{-10}$;

(2) ^{152}Gd 其自然丰度为 0.2%,是 α 放射性,半寿命长达 1.08×10^{14} 年. 麻烦的是采用化学-物理方法很难把它从自然 Gd 中萃取出来. 这可能是 LENS 放弃采用载 Gd 液闪的原因之一. 我们采用载 Gd 闪烁体的原因之一(还有其他原因,如含 Gd 已有晶体(GSO),而含镱的则没有)是 Michel Cribier 等人^[14]提出好方法:采用强中子束流照射之,把 ^{152}Gd “烧掉”. 表 1 给出 Gd 各同位素的自然丰度及经流

表 1 Gd 同位素性质及经中子照射后各同位素的余量

同位素	自然丰度	衰变半寿命	热中子俘获截面/b	共振截面/b	中子($2 \times 10^{14}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) 照射 700 天后同位素的余量
^{152}Gd	0.2%	1.08×10^{14} 年	934	989	2×10^{-8}
^{153}Gd	—	241.6 天	$\approx 50,000$	≈ 1000	
^{154}Gd	2.18%	∞	75	219	0.9%
^{155}Gd	14.8%	∞	45,500	1,534	1.6×10^{-5}
^{156}Gd	20.47%	∞	1.9	120	34%
^{157}Gd	15.65%	∞	192,000	761	4×10^{-6}
^{158}Gd	24.84%	∞	2.2	64	40%
^{159}Gd	—	18.48 小时	200	90	
^{160}Gd	21.86%	∞	0.7	12	21.7%
^{161}Gd	—	3.66 分			
^{162}Gd	—	8.4 分			

1) 至于构成典型尺寸的复合探测器用以测量光的衰减长度,其测量方法是常规的,技术上无问题. 但 GSO 晶体昂贵,构成该复合探测器的主要困难是受科研经费的限制.

强为 $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 中子束照射 700 天后各同位素的剩余含量. 从表中可见, ^{160}Gd 的含量几乎保持不变(从 21.86% 到 21.7%), 而 ^{152}Gd 几乎被“烧完”, 仅余 2×10^{-8} , 所以用强束流的中子辐照 Gd, 以大量地去除 ^{152}Gd 是可行的.

另一方面, 可以从反应堆用过的控制棒中提取 Gd, 而其中的 ^{152}Gd 的含量也一定很低, 因为控制棒中含有 8% 的 Gd_2O_3 , 在其使用之后, 其中的 ^{160}Gd 含量几乎不变, 而 ^{152}Gd 几乎已被“烧尽”.

至于中子照射所造成的活化本底问题, 其活化同位素均为短寿命或不是长寿命的, 只要搁置较长时间后, 它们基本上都“死光”了. 特别是从放置 20 乃至 30 年后的在反应堆已用过的控制棒中提取 Gd, 几乎不存在活化本底的问题.

4 结论

所研制的载 Gd 5% 液闪和 GSO 小块晶体基本

达到由二者构成的复合探测器的要求, 新型太阳中微子闪烁探测器的研制方案是可行的.

为探索 $^7\text{Be} + \text{PP}$ 中微子所蕴含的新物理, 为精确地确定太阳中微子的振荡解, 并最终解决太阳中微子问题, 新的下一轮的太阳中微子实验的目标是精确地测出太阳中微子的全能谱. KamLAND, BOREXINO 虽然可测出太阳中微子全能谱, 但它们只能测 ν_e -e 散射事例, 不能测电荷流事例, 因而难以获得与模型无关的实验结果. 另一方面它们要达到很低的本底也有困难. LENS 和载钆复合探测器既可测出太阳中微子全能谱, 又可同时测出散射事例与电荷流事例, 是最有希望的新型太阳中微子探测器. 而载 Gd 复合探测器与 LENS 相比较, 则更有优势, 更有希望, 因为它可载有高浓度的 Gd、性能稳定, 可缩小体积以利于采用主动式、被动式的屏蔽措施, 降低本底. 另一方面, 其探测器本身更易做到低的放射性, 更易达到低本底.

参考文献 (References)

- 1 Davis R et al. Phys. Rev. Lett., 1968, 201205
- 2 Hampel W et al (GALLEX Collab.). Phys. Lett., 1999, **B447**:127
- 3 Abdurashitov J J N et al (SAGE Collab.). hep-ph/0204245
- 4 Smy M B et al (Super Kamiokand. Collab.). hep-ex/0202020
- 5 DAI Chang-Jiang et al. Chinese High Energy Physics Development and Stragem Conference, May 2000 (in Chinese)
(戴长江等. 中国高能物理发展战略研讨会报告文集非加速器物理分册, 2000 年 5 月)
- 6 Ahmad Q R et al (SNO Collab.). Phys. Rev. Lett., 2002, **89**(1): 011301, 011302
- 7 Eguchi K et al (KamLAND Collab.). hep-ex/0212021
- 8 Bahcall J N et al. hep-ph/0212147
- 9 Back H O et al (BOREXINO Collab.). Phys. Lett., 2002, **B525**:29
- 10 LENS Collaboration. Proposal to Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), 1999
- 11 Raghavan R S. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:3618
- 12 Yamanaka T et al. LENCSE Workshop May 1998 in Paris
- 13 DAI C J et al. Development of new Detectors for Measurement of pp and ^7Be Solar neutrino, Talk at the Workshop'98 in Oulu of Finland
- 14 Michel Cribier. DAPNIA/SPP 99-09, Saclay, April 22, 1999

Development of a New Detector for Solar Neutrino Detection *

DAI Chang-Jiang¹⁾ HE Hui-Lin YE Zi-Piao SHENG Xiang-Dong

(Astroparticle Physics Center, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The research and development of a new type detector for solar neutrino detection is introduced. The detector uses two types of scintillators: one is the gadolinium(Gd) loaded liquid scintillator with the concentration of 5 % , for which the light attenuation length is $\geq 150\text{cm}$ and the energy resolution is 21 % (standard deviation) for 60keV Gamma-ray; the other is a $\phi 1\text{cm} \times 3\text{cm}$ GSO:Ce crystal, which has the light yield 20 % with respect to the NaI:Tl, the light decay time 60ns and the energy resolution 9.2 % (standard deviation) for 662keV Gamma-ray. The characters of the detector composed by both scintillators for solar neutrino detector and the methods to suppress the background are discussed. A simulation for such detector with the size $\phi 10\text{cm} \times 50\text{cm}$ shows the light collection efficiency can reach 20 % .

Key words solar neutrino detector, mixed detector, Gd loaded liquid scintillator, GSO crystal