

探测低能量太阳中微子的低温两相电子泡探测器

巨永林^{①②} 顾妍^① J. Dodd^② R. Galea^② M. Leltchouk^② W. Willis^②
P. Rehak^③ V. Tcherniatine^③

(^① 上海交通大学, 制冷与低温工程研究所, 200240 上海; ^② Columbia University, Nevis Laboratories, P. O. Box 137, Irvington, NY 10533, USA; ^③ Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA. E-mail: yju@sjtu.edu.cn)

摘要 提出并设计了一种新型的低温两相中微子探测器, 它利用电子泡在液氦池中特殊的传输特性, 实时、高效地测量了来自太阳质子-质子反应产生的低能量中微子. 该电子泡探测器的工作原理类似于时间投影室, 当入射中微子进入到探测介质液氦池中后, 与氦原子发生作用, 会激发弹性散射电子, 通过测量这些散射电子的能量及轨迹并与放射性背景信号分开, 就可以反推出入射中微子的能量和其他性质. 由于散射电子的信号很弱, 因此使用位于液面上方饱和蒸汽区的气体电子倍增器放大电子信号. 这种技术的突出优点是具有极高的空间分辨率和很好地抑制电离信号反馈的功能. 基于气体电子倍增器读取电信号和高精度CCD相机以进行探测光信号的新型时间投影室的研究, 目的是建造一个三维的空间分辨率为几个毫米量级的大型液氦低温探测器, 以探测能量低至 100~200 keV 的太阳中微子.

关键词 低温探测器 太阳中微子 电子泡

迄今为止, 对于来自太阳的低能量中微子的探测仍然是一项严峻的实验挑战^[1~4], 这是我们近些年来一直关注并研究的课题^[5]. 现在正在运行的实验(参见Kirsten^[1]对太阳中微子探测的综述), 如依靠在镓、氯中产生的放射化学技术(如Homestake, GALLEX/GNO和SAGE), 或是在水基探测器中的契伦柯夫效应, 通常对较高能谱范围的中微子通量(量级在 1~10 MeV)灵敏. 然而, 这只是所有太阳中微子通量的很小一部分, 大约有 98% 的太阳中微子的能量是低于 1 MeV 的. 而且, 在现有的实验中, 只有契伦柯夫探测器提供了有关入射中微子的能量信息. 未来太阳中微子天文学的主要目标是测量能量低于 1 MeV 的中微子流, 特别要测量质子-质子反应主序列产生的中微子流. 它们在低于 420 keV 时有连续的能谱, 并在 200~300 keV 的范围内出现峰值, 且到达地球上的中微子通量正好为预测值 $5.94 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[6]. 低能量中微子流的精确测量将对我们理解中微子物理学(如低能量中微子真空振动)和太阳内部发光机制有显著的影响. 同时可以帮助我们了解为什么根据标准太阳模型所计算出的太阳内部核聚变反应产能, 与光子和中微子通量的实验测量不一致.

为此, 目前已有一些针对于质子-质子反应主序列产生的中微子通量的实时探测器的实验原理和技

术方案(如HERON, HELLAZ, Super-MuNu和LENS)正在进行. 对它们的完整的技术比较不在本文的讨论范围内. 值得一提的是HERON方案^[7], 它采用超流氦为探测介质, 利用低温晶片热量计来探测被紫外声子和声子/旋子所蒸发的氦原子, 紫外声子和声子/旋子是液氦表面反冲的电子生成的. HERON的主要困难就是要求 50 mK 的超流氦, 并且为了避免 ³He 旋子的散射, 要求氦是同位素纯的. 本文将介绍一种新型的低温两相中微子探测器, 它利用电子泡在液氦池中特殊的传输特性, 实时、高效地测量来自太阳质子-质子反应产生的低能量中微子.

从功能上说, 这种低温两相中微子探测器的工作原理类似于时间投影室(TPC), 但工作在两相区. 当入射中微子进入到探测介质液氦池中后, 与氦原子发生作用, 会激发弹性散射电子, 通过测量这些散射电子的能量及轨迹并与放射性背景信号分开, 就可以反推出入射中微子的能量和其他性质. 由于散射电子的信号很弱, 需要将电信号放大. 气体电子倍增器(GEMs)可以在低温惰性气体中工作并具有很高的增益^[8,9]. 一些研究机构正在研究基于气体电子倍增器的时间投影室并把它作为一种中心追踪装置^[10,11]. 这种技术的突出优点是具有极高的空间分辨率和很好地抑制电离信号反馈的功能.

2007-03-26 收稿, 2007-04-13 接受

美国国家自然科学基金(批准号: PHY00-98826 和 PHY05-00492)和上海市科学技术委员会浦江人才计划(编号: 06PJ14052)资助项目

由于太阳中微子的低能量和低反应速度,电子泡探测器必须具有很高的能量分辨率(能够有效地测量 keV 的信号)、很高的空间分辨率(达到几个 mm³)、足够大的体积(为得到更高的探测比率)及很低的背景噪声和密度(以减少多次散射).液氮中电子泡的存在及其特殊的传输性质^[12~14]使得它特别适合低能量中微子探测器的要求:本底干扰低,低温提供了足够的空间和能量分辨率,在体积巨大的探测介质中、电子泡缓慢的迁移速度非常有利于探测并及时处理大量信号.

液氮作为探测介质还有很多其他优点.首先,在液氮中电子泡可以沿外加电场梯度方向以与电场强度成正比的速度(迁移率)自由移动,这样可以在由一组电荷探测器组成的平面列阵上加上时间信号形成三维轨迹图像.其次,在合适的电场强度下,电子泡的迁移速度约为 10 cm/s,这为探测并及时处理大量信号提供了足够的读取时间.另外,电子泡的热扩散效应在低温下会显著降低,这表明在液氮温度下灵敏度会更高.高空间和能量分辨率的要求可以很容易在密度小,热扩散低的探测介质中得到.氮的密度很小,在给定质量下探测介质会有较大的探测体积,这使得低能量粒子具有较长的空间运行轨迹.较长的迁移时间允许最大限度的利用多路数据读取技术,把大量三维图像数据转换传输到一些能够承载高速数据流的数量相对较少的输出信号线中.另外一个特别优点是,氮的辐射长度约为 7 m,结合其高的空间分辨率,就可以在很低的磁场中(低如 0.1 T)对电荷和动量进行磁测量.除此之外,当电子泡运动到气-液界面附近时,会被束缚住,束缚时间取决于局部液体温度和电场强度,这为电子信号的光学探测提供了基础.对于束缚在电子泡中的电子,可以利用可见光或红外线光脉冲产生光电离效应,或通过加热方法,让其从电子泡中逃脱出并进入气相.在气相中电子会以正常的高速迁移率运动.液氮最突出的特点是其高纯度,从本质上来说液氮中是没有其他杂质溶解在这样低的温度下的.因而,即使迁移路径很长,电子也不存在被其他杂质捕获的机会,这也意味着液氮中没有放射性衰变源.

综上所述,我们提出在液氮中对带电离子轨迹进行探测.因此我们首先设计并造做了一个尺寸相对较小的液氮电子泡室,来进行新型探测器的预先研制和运行原理的实验验证.该电子泡室的有效容

积是 1.5 L,由一个液氮恒温器和一个液氮恒温器来冷却,可系统实验研究电子泡的传输性质,从而确定很多基本的物理和技术参数.基于该技术的参量探测器包含一系列有趣的实验挑战,目前正在研究同时基于电信号和光信号的探测方案,在低温液体内部及通过气-液界面进入气相之后的电子进行有效探测.

通过一系列测试,该液氮电子泡室已经成功运行在不同的低温区,满足了在低温氮气和液氮中电子泡物理参数的测量要求^[15].目前正在研究带电粒子到达探测面时的读取方法.首要目标是找到可以将电信号放大的方法,以便探测到低能量电信号.实验中测试了标准的气体电子倍增器(GEM)(来自 CERN,欧洲粒子物理研究中心)的放大效果,发现最常用三个 GEM 串联结构,可以成功地在 3~393 K 温度范围内的氮气以及氮气/氢气混合物中工作,并且观察到了在 3 K 以下低温氮气中的增益.当极少量氢气加入氮气中后,可以获得很高的增益,具体测量结果见文献^[16,17].

基于利用电子泡室对两相气体电子倍增器测量所得到的实验结果,我们给出实际尺寸电子泡探测器的基本原理,以利用液氮探测低能量太阳中微子.目的是利用时间投影室技术,在液氮中探测带电粒子,空间分辨率为几个毫米.另外,时间分辨率约为 100 ns.这是基于两点考虑:一方面,空间和时间分辨率要足够小,使得我们能够在一次测量周期中分辨出两个事件,同时无序的背景干扰信号概率必须足够小,不过这两点很容易利用长基线实验和位于地下的探测器得到满足;另一方面,测量周期又不能太短,因为需要处理发生在探测器中的大量事件.

最主要的问题是如何分离出来自探测介质和低温恒温器壁的剩余放射性、以及如何识别能量范围在 100~200 keV 的大量带电粒子的能量和方向.来自质子-质子反应主序列产生的太阳中微子来自于: $p+p \rightarrow {}^2\text{H}+e^++\nu_e$. 这些中微子在能量低于 420 keV 下具有连续的能谱,其峰值在 200~300 keV 的范围间.我们提出探测的反应是弹性散射的过程: $\nu_e+e^- \rightarrow \nu_e+e^-$. 最大的反冲电子能量约为 260 keV.对液氮中 200 keV 的电子轨迹进行模拟,得到平均轨迹长度约为 3 mm.

图 1 为本文提出的实际探测器的原理示意图.基于每年探测 1000 个太阳中微子-电子散射事件的概率,该探测器的低温恒温器为圆柱形,直径为 3 m,

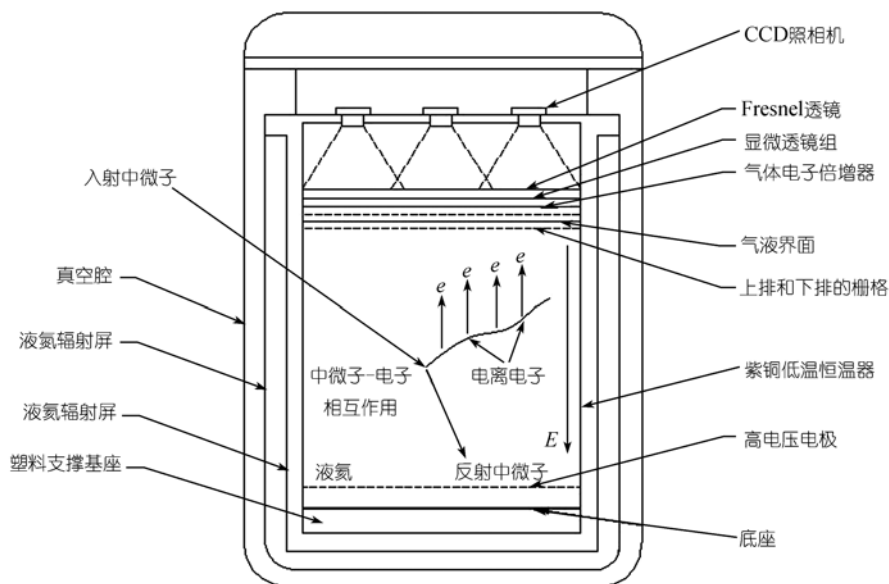


图1 中微子探测器原理示意图

包括位于液面上方具有电子和光学读取功能的气体电子倍增器、透镜阵列和 CCD 照相机组成

高约 6.5 m, 内装 5 t 液氮。当太阳中微子进入探测器, 与探测介质相互作用, 将通过弹性散射激发出原子电子, 其平均能量为 200 keV。在电场作用下, 这些电子将穿过探测介质, 经过一系列的电离失去部分能量, 导致有限的路径长度和电离密度(由于反冲电子能量低于 1 MeV, 放射能损失可以被忽略)。于是电子在介质中会形成一系列轨迹, 该轨迹将反映出中微子的能量和最初来源。带电粒子轨迹的长度, 即行程和粒子能量具有特定的关系。粒子轨迹可能会与探测器的尺寸量级一样, 即 6 m 长, 或可能像分辨单元一样短。在 1 kV/cm 的外加电场作用下, 沿着电场梯度方向, 电离的电子(电子泡)在探测器中的迁移速度很慢, 约为 0.1 m/s。对于低概率、低本底背景噪声, 迁移时间长是一个优点, 用来储存信号, 这样信号可实现依次被探测读取。

当电子迁移到气-液分界面时, 会短暂停留在表面之下, 具体位置取决于镜像电荷力与外加电场力之间的平衡。电子被短暂束缚住直到它们通过扩散或隧道效应进入气相中, 束缚时间取决于局部温度和电场强度。该束缚时间可长达几秒钟, 然后电子从表面脱离进入到气相空间被探测。这可以通过对位于气-液分界面上排和下排的栅格(面积约为 10 m^2)施加局部电脉冲, 或是采用线偏振光束聚焦扫描表面的方式, 使得位于气-液分界面处的局部电子光化电离, 从而使得电子逃逸出。值得关注的是该束缚时间

可以用来储存信号, 这样就可以依此读取电子信号。

在气相空间, 自由电子将以正常较高的迁移率^[12~14], 到达位于气-液分界面上方气相区中, 以串联方式布置的气体电子倍增器的第一个电极面, 电子通过该电极面被放大, 然后通过第二个电极面继续放大。所有电子信号的绝大部分会放大通过最后一个电极面, 然后在由电荷探测器组成的平面阵列上被依次采集, 获得每个点或像素的信息。这样就形成了三维读出: 平面电荷探测器读出二维位置信号, 第三维是时间信号读出。因为在给定尺寸的探测器中, 电荷信号移动的距离和时间之间存在线性关系, 这正是时间投影室的工作原理。

气体电子倍增器一个重要的结构特点是放大过程被局限在一个很小的体积中, 只占据一个直径约 $50 \mu\text{m}$ 小孔的中央部分。当电子通过气体电子倍增器放大区域产生雪崩后, 会产生大量的可见光发射^[11]。基于此, 除了电子学信号的读取, 我们还提出了倍增器中光信号的读取。一组标准的高分辨率 CCD 照相机被安装在其性能最佳的工作温度区域(高于 50 K), 用于光信号的读取。

为了捕捉到更多的可见光信号, 采用一组带有显微透镜的相空间匹配系统, 传输可见光到 CCD 照相机。这种透镜是用很小的镜头浇铸在塑料薄片上制作而成的, 用它作为物镜, 可以有效地将可见光传

输到 CCD 照相机, 如图 1. 在透镜和照相机镜头之间, 安装了另一种采用 Fresnel 技术制作的更大的物镜, 它的作用是可以有效地把分布在气体电子倍增器表面的大量倍增通道上的光信号引导到照相机镜头上. 计算结果表明, 这种透镜的光学俘获效率达到几个百分点, 比简单的系统高很多. 透镜、Fresnel 物镜和 CCD 照相机镜头都被安装在较低的温度下, 而照相机本身被安置在 50 K 的温度中, 这是标准 CCD 照相机最适宜的工作温度.

通过电子倍增和可见光探测得到的电子和光学信号, 将被用来决定每个事件的能量和方向. 低温恒温器本身可以采用本底噪声很低的材料(如铜或塑料)制作, 以减小来自壁面的放射性发射. 为了获得清楚的图像, 探测器中信号概率必须足够小. 实际情况中, 只有在地下实验室的环境下才可行.

探测器下一步的工作计划是建立在已有的两相低温气体电子倍增器测量结果及正在进行的 CCD 成像工作基础上的. 目前一个 1 m^3 尺寸探测器原理样机的工程设计, 包括高压电极、低噪声、基于 CCD 照相技术的低温电子和光学信号读取装置等, 正在进行中. 这将为我们发展实际低能量太阳中微子探测器提供一个基准, 进而帮助我们获得所必须的事件概率和低背景噪声, 以探测到低能量太阳中微子.

参 考 文 献

- 1 Kirsten T A. Solar neutrino experiments: Results and implications. *Rev Mod Phys*, 1999, 71(4): 1213—1232[DOI]
- 2 Lanou R E. Future solar neutrino projects. *Nucl Phys*, 1999, 77(Suppl): 55—63
- 3 Bahcall J N, Pinsonneault M H. What do we (not) know theoretically about solar neutrino fluxes? *Phys Rev Lett*, 2004, 92(12): 121301[DOI]
- 4 Turck-Chièze S, Couvidat S, Piau L, et al. Surprising sun: A new step towards a complete picture? *Phys Rev Lett*, 2004, 93(21): 211102[DOI]
- 5 Dodd J, Leltchouk M, Radeka V, et al. Novel electron-bubble particle detectors. Columbia University and Brookhaven National Laboratory, 2000. <http://www.nevis.columbia.edu/~ebubble/>
- 6 Bahcall J N, Basu S, Pinsonneault M H. How uncertain are solar neutrino predictions? *Phys Lett B*, 1998, 433: 1—8
- 7 Bandler S R, Brouer S M, Enss C, et al. Angular distribution of rotons generated by alpha particles in superfluid helium: A possible tool for low energy particle detection. *Phys Rev Lett*, 1995, 94(16): 3169—3172[DOI]
- 8 Bondar A, Buzulutskov A, Shekhtman L, et al. Cryogenic avalanche detectors based on gas electron multipliers. *Nucl Instr Meth A*, 2004, 524: 130—141[DOI]
- 9 Mormann D, Breskin A, Chechik R, et al. Evaluation and reduction of ion back-flow in multi-GEM detectors. *Nucl Instr Meth A*, 2004, 516: 315—326[DOI]
- 10 Kappler S, Bieser F, Kaminski J, et al. Design and construction of a GEM-TPC prototype for research and development purposes. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2004, 51(4): 1524—1528[DOI]
- 11 Margato L M S, Fraga F A F, Fetal S T G, et al. Performance of an optical readout GEM-based TPC. *Nucl Instr Meth A*, 2004, 535: 231—235[DOI]
- 12 Fetter A L. *The Physics of Liquid and Solid Helium*. New York: Wiley, 1976
- 13 Maris H J. Properties of electron bubbles in liquid helium. *J Low Temp Phys*, 2003, 132(112): 77—95[DOI]
- 14 Schmidt W F. *Liquid state electronics of insulating liquids*. New York: CRC Press, 1997
- 15 Ju Y L, Dodd J R, Willis W J, et al. Cryogenic design and operation of liquid helium in electron bubble chamber. *Adv Cryo Eng*, 2006, 51: 433—440
- 16 Buzulutskov A, Dodd D, Galea R, et al. GEM operation in helium and neon at low temperatures. *Nucl Instr Meth A*, 2005, 548: 487—498[DOI]
- 17 Dodd J, Galea R, Ju Y, et al. Gas purity effect on GEM performance in He and Ne at low temperatures. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2006, 53(4): 2260—2263[DOI]