

太阳中微子迷雾的第一瞥

林 箫¹ 周 宁^{2,3,†} 刘江来^{2,3}

(1 中国科学技术大学现代物理系 合肥 230026)

(2 上海交通大学李政道研究所 上海 201210)

(3 上海交通大学四川研究院 成都 610213)

2024-12-11收到

† email: nzhou@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250106

CSTR: 32040.14.wl20250106

1 研究背景

自中微子第一次被探测到以来,它成为给予人们最多惊喜的一个标准模型粒子,在过去几十年间也一直处于基础研究的最前沿。中微子与普通物质的相互作用很弱,其中一个反应过程叫相干弹性散射,在历史上它一直与暗物质的直接探测有趣地交织在一起。

1973年,欧洲核子研究中心的实验物理学家们利用一个巨型气泡室,成功探测到了中微子的一种全新相互作用类型,被称为“中性流”过程^[1]。翌年,纽约大学石溪分校的Freedman指出,在中微子的德布罗意波长与原子核半径相当的情况下,中微子与原子核中的所有核子都会发生相干性中性流反应,反应截面因正比于核子数平方

而增强,此种反应被称为中微子—原子核相干弹性散射(coherent elastic neutrino-nucleus scattering, CEvNS)^[2]。此后十多年,粒子物理标准模型的拼图逐渐被完善。1983年中性流反应的传播子——Z玻色子被哈佛大学Rubbia领导的UA1实验发现^[3],第二年Rubbia就获得了诺贝尔物理学奖,但是CEvNS过程仍然未被实验所观察到。1984年,德国马普物理所的Drukier和Stodolsky指出,由于CEvNS造成的原子核反冲能量在keV量级,实验的挑战在于显著降低探测器的能量阈值和本底水平^[4]。这个想法很快被普林斯顿大学的Goodman和Witten“借用了”,因为这样的探测器非常适合探测理论预言中的冷暗物质粒子与原子核发生的散射^[5],从此拉开了近40多年暗物质直接探测的浪潮^[6]!40年间,暗物质探测灵敏度不断被刷新,人们也渐渐把注意力集中在暗物质粒子的探测上,而这类探测器对测量的CEvNS“初心”反倒是变得相对冷门。时间快进到2017年,CEvNS有了第一个实验突破。COHERENT实验利用橡树岭国家实验室的散裂中子源产生的高流强、高能量中微子,首次探测到了CEvNS过程^[7]。同时,随着暗物质直接探测实验灵敏度的不断提升,人们预测在不远的未来,太阳以及大气中微子在探测器中产生的CEvNS事例将成为暗物质直接探测实验不可避免的“终极”本底,被称作“中微子迷雾”^[8]。

2 PandaX-4T 探测器

我们利用PandaX-4T实验的95天试运行数据(Run0)和164天的首批物理运行数据(Run1)来搜寻太阳中微子CEvNS信号。PandaX-4T探测器是一



图1 900吨纯水罐中心 PandaX-4T 探测器

个灵敏靶质量为3.7吨的二相型氙时间投影室,位于中国锦屏地下实验室2400米深的岩石下,置于一个900吨纯水罐的中心位置(图1)^[9, 10],其主要科学目标是直接探测暗物质,以及通过无中微子双贝塔衰变寻找马约拉纳中微子。

时间投影室(TPC)是一种圆柱形探测器,内部一般设有三层高透光电极,分别为阴极、门电极和阳极,从下到上排列。当粒子在阴极和门电极之间的灵敏靶区域发生碰撞时,产生的闪烁光会被分布于时间投影室顶部和底部的光电管阵列探测到,称为S1信号。与此同时,产生的电离电子在电场的作用下漂移至电场强度更大的放大区(即门电极与阳极之间的区域,也是二相型探测器气液分界面所在区域),并被放大为光信号,同样由光电管收集,称为S2信号。

时间投影室通过分析S1和S2信号的时间差,以及S2信号在顶部光电管阵列上的分布,能够以较高的精度(通常小于1 cm)重建粒子碰撞的三维位置。此外,波形分析技术可以有效区分单次散射和多次散射事件。这些技术显著降低了由外部放射性物质产生的伽马射线和中子背景,同时在液氙中利用S2/S1比例可以进一步将伽马和贝塔射线背景降低2到3个数量级。这些优点使得二相型氙时间投影室成为目前质量在10 GeV/c²以上暗物质直接探测领域的主导技术^[11]。

极低背景水平也让二相型氙时间投影室走在了探测太阳中微子CEvNS队伍的前列。搜寻的主要目标是太阳内部聚变过程中产生的第二高能量中微子,来自于硼-8元素衰变过程的中微子,贝塔衰变产物的总动能约14 MeV。但这个能量的中微子在PandaX-4T液氙探测器中留下的能量也基本上是小千keV的,并且在这个能量范围内有着大量影响探测灵敏度的本底。因此,在PandaX-4T中进行对于太阳中微子CEvNS信号的探测,最大的挑战是如何有效地降低探测能量阈值,增大对太阳中微子CEvNS的接收度;同时理解低阈值区域的大量背景事件,并找出有效甄别背景的方法。

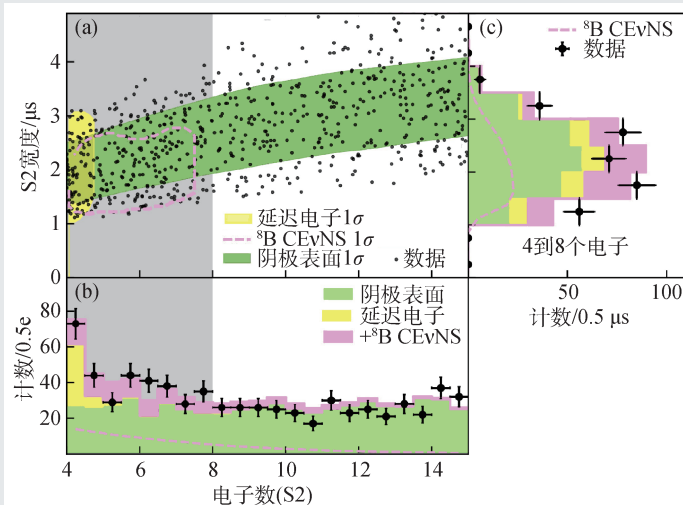


图2 (a) PandaX-4T采集到的US2数据在能量和信号宽度上的二维分布,黄色和绿色阴影区分别为模型预测下延迟电子和阴极表面本底的1σ分布区域,粉色虚线内为中微子CEvNS的1σ分布区域,灰色阴影区是我们分析中用于中微子CEvNS搜寻的信号范围;(b, c)分别为能量谱和宽度谱的一维投影,绿色、黄色和粉色直方图分别代表了阴极表面本底、延迟电子本底以及太阳中微子CEvNS信号的贡献

我们采用两类数据集对太阳中微子CEvNS进行研究:一种是同时具有S1和S2信号的事件,称为配对数据集(paired);另一种是仅有S2而没有S1信号的事件,称为单独电离数据集(US2)。配对数据集的能量阈值较高,这主要是因为时间投影室对S1的探测效率仅约为10%,因此S1的阈值直接影响了配对数据集的能量阈值。然而,配对数据集保留了完整的位置重建能力,能够有效排除绝大多数由材料表面放射性引起的背景事件。通过优化S1的筛选标准(要求至少有2个光电管同时探测到S1,并降低对S1信号强度的要求),配对数据集的阈值可以降低至约0.8 keV。另一方面,单独电离数据集完全忽略S1,仅关注放大的S2信号(探测效率可达90%以上),因此能显著降低阈值至约0.33 keV;但代价是单独电离数据集无法重建事件的深度信息,无法完全消除阴极表面产生的背景影响,因此其背景水平相较于配对数据集较高。

配对数据集的主要背景来自偶然符合事件。所谓偶然符合事件,指的是仅有S1或仅有S2的事件在时间上非常接近,从而形成看似目标信号的伪“事件”。而单独电离数据集的本底主要包括阴极表面本底和探测器内部的延迟电子堆叠本底。

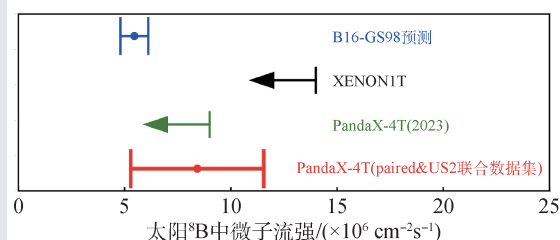


图3 PandaX数据通过CEvNS对于太阳硼-8中微子流强的测量,红色为本文结果,XENON1T和PandaX-4T(2023)结果均为之前的中微子流强上限

分析团队基于大规模统计数据精确构建了这些背景的可靠模型,并采用机器学习和多维拟合等算法,有效排除了绝大部分背景事件,显著提升了信噪比。最终分析预测,在配对数据集中,Run0和Run1分别有 1.31 ± 0.28 和 1.51 ± 0.36 个本底事件,同时预计将观察到 1.24 ± 0.26 和 2.16 ± 0.53 个太阳硼-8中微子CEvNS事件,信号本底比大致在1左右,但受统计波动影响较大。对于单独电离数据集,预计在Run0和Run1中将观察到 126 ± 24 和 125 ± 21 个背景事件(其中80%来自阴极表面),同时预测会观测到 18 ± 4 和 25 ± 6 个中微子CEvNS信号事件。值得注意的是,尽管单独电离数据集的背景比配对数据集高,但由于信号统计量大幅增加,减少了统计波动的影响。因此,配对数据集和单独电离数据集在不同的能量区间和信噪比上形成了有效的互补。

3 突破性进展

PandaX-4T分析团队结合Run0和Run1两批共259天数据,并在配对数据集及单独电离数据集同时搜寻太阳中微子CEvNS信号。最终拟合在信号大小及宽度的二维参数空间进行,结果显示数据中(尤其是在低能单独电离数据区间)存在背景以上的超出,超出部分的特征分布符合太阳硼-8中微子CEvNS信号(图2)。在PandaX-4T大约1吨-年的曝光量数据中,太阳硼-8中微子信号的最佳拟合值为78.5个事件(包含3.5个配对事件和75个单独电离事件),信号显著度为 2.64σ ,即数据中不存在太阳硼-8中微子信号的可能性仅为

0.4%。PandaX-4T对太阳硼-8中微子流强的测量值为 $(8.4 \pm 3.1) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,和标准太阳模型预期符合(图3)。这是国际上首次观测到太阳中微子和原子核相干弹性散射的迹象^[12]。

4 对未来的意义

PandaX-4T暗物质探测实验成功探测到了太阳中微子与原子核的相干散射信号,这标志着一个里程碑式的探测灵敏度。首先,证明了PandaX-4T这类暗物质探测实验所追寻的暗物质粒子在探测器中留下的潜在信号与太阳中微子CEvNS信号在特征上高度一致。并且能够探测到太阳中微子CEvNS这样极其稀有的物理过程,直接证明了目前同类探测器对于潜在暗物质粒子的探测能力。

从另一个角度来看,暗物质的直接探测达到如此灵敏度,使得PandaX-4T以及未来更大的升级版探测器成为一个强有力的中微子探测器,这为研究中微子相互作用规律提供了全新的视角。中微子相干散射通道是一种纯中性流的探测信道,能够提供一定的能量信息。这与现有主要基于中微子带电流过程的探测方法形成了互补关系,并在研究太阳内部过程、“多信使”天文学^[13]、中微子超标准相互作用的搜寻^[14]以及反应堆绿色监测^[15]等领域展现了广阔的发展前景。

参考文献

- [1] Hasert F J *et al.* Physics Letters B, 1973, 46: 121
- [2] Freedman D Z. Phys. Rev. D, 1973, 9: 1389
- [3] Collaboration UA1. Physics Letters B, 1983, 126: 398
- [4] Drukier A, Stodolsky L. Phys. Rev. D, 1984, 30: 2295
- [5] Goodman M W, Witten E. Phys. Rev. D, 1985, 31: 3059
- [6] Liu J, Chen X, Ji X. Nature Physics, 2017, 13: 212
- [7] COHERENT Collaboration. Science, 2017, 357: 1123
- [8] O'Hare C A J. Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 251802
- [9] 湛勋, 季向东, 刘江来. 物理, 2015, 44: 734
- [10] PandaX Collaboration. Sci. China. Phys. Mech. Astron., 2019, 62: 31011
- [11] PandaX Collaboration. Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 261802
- [12] PandaX Collaboration. Phys. Rev. Lett., 2024, 133: 191001
- [13] PandaX Collaboration. Chin. Phys. C, 2024, 48: 073002
- [14] Anderson A J *et al.* Phys. Rev. D, 2012, 86: 013004
- [15] Raesfeld C, Huber P. Phys. Rev. D, 2022, 105: 056002