

小型中微子探测器研究进展

黄迁明, 李兰, 吕焕文, 应栋川

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213

摘要 小型中微子探测器在核电厂监测、核潜艇探测、地球物理研究方面具有广泛的应用前景。综述了小型中微子探测器的研制进展, 介绍了中微子的种类以及地球中微子、太阳中微子、反应堆中微子的来源和探测原理, 针对固体闪烁体、液体闪烁体等探测器类型, 以及中微子相干散射、反 β 衰变等不同探测原理, 梳理了国内外探测技术发展现状以及现有小型中微子探测器样机, 分析了不同探测器的结构组成及探测能力, 总结出基于固体塑料闪烁体的反 β 衰变探测器是理想的小型中微子探测器, 探讨了小型中微子探测器的发展脉络及前景, 提出中国需要开发具有自主知识产权的小型中微子探测器的建议。

关键词 小型中微子探测器; 反 β 衰变; 中微子相干散射; 地球物理; 反应堆监测

中微子与物质的相互作用截面极小而很难探测, 其携带的信息经过宇宙中长距离穿行而不丢失, 因而通过准确测量中微子信号, 可以进行多个前沿科学问题的研究。从1930年泡利提出中微子假说, 到1956年人类第一次探测到中微子^[1], 再到2017年发现中微子相干散射 (coherent elastic neutrino-nucleus scattering, CEvNS)^[2], 经过几十年的发展, 人们已经了解了大量中微子的性质, 并发展了多种中微子探测方法^[3-4]。小型化的中微子探测器在核电厂监测^[5-9]、核潜艇探测及通信^[10-12]、地球物理研究方面^[13-16]均有应用需求, 近年来随着对中微子研究的深入, 国内外针对小型中微子探测器进行了广泛研究。

1 中微子测量方法

在粒子物理标准模型中, 中微子分为3代, 分别为电子中微子、缪子中微子、陶子中微子以及3种对应的反中微子(图1)。

1.1 中微子来源

地球中微子是地球内部天然放射性元素(主要是²³⁸U、²³²Th和⁴⁰K 3种同位素)衰变以及²³⁵U裂变产生的反电子中微子, 它们在衰变和裂变过程中也同时释放出大量热量, 是驱动地球演化的主要地热能来源之一, 地球中微子的通量和产生的热能成固定比例, 因此测量地球中微子的通量, 可以获得放射性元素分布及其对地热能的贡献, 地球中微子能谱如图2所示^[3]。

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2022-11-02

作者简介: 黄迁明, 高级工程师, 研究方向为核技术及应用, 电子信箱: huangqianming@pku.org.cn

引用格式: 黄迁明, 李兰, 吕焕文, 等. 小型中微子探测器研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(11): 105-112; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2023.11.011

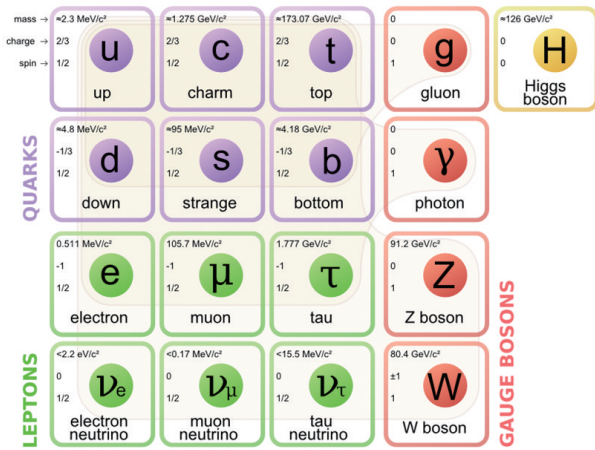


图1 标准模型中基本粒子组成

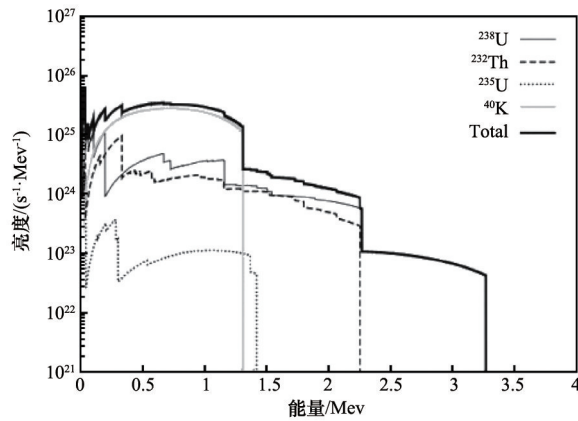


图2 地球中微子能谱

太阳中微子是太阳进行核聚变反应的产物,穿过地球的中微子绝大部分是太阳中微子。太阳内部产生中微子有多种反应,如式(1)~(3)所示:

$$p+p \rightarrow d+e^++\nu_e \quad (1)$$

$${}^7\text{Be}+e^- \rightarrow {}^7\text{Li}+\nu_e \quad (2)$$

$${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}+e^++\nu_e \quad (3)$$

其中最重要的是式(1)所示的质子-质子反应链,86%的太阳中微子通过这项反应产生,其次是式(2)所示的⁷Be捕获电子,产生了14%的太阳中微子,⁸B不稳定,衰变会产生能量较高的电子中微子,而对太阳中微子数量的贡献仅约0.02%。

反应堆中微子是反应堆中铀裂变反应的产物,平均每次裂变产生约200 MeV的能量以及6个电子反中微子^[17],例如式(4)~(6)所示的反应过程:

$$\text{U}+n \rightarrow {}^{94}\text{Kr}+{}^{140}\text{Ba}+2n+200 \text{ MeV} \quad (4)$$

$${}^{140}\text{Ba} \rightarrow {}^{140}\text{La}+e^-+\bar{\nu}_e+1 \text{ MeV} \quad (5)$$

$${}^{94}\text{Kr} \rightarrow {}^{94}\text{Rb}+e^-+\bar{\nu}_e+7.5 \text{ MeV} \quad (6)$$

可以看出,反应堆中微子与地球中微子能量均较低,只有几个 MeV,由于一次裂变产生的中微子较多,对于一座热功率3000 MW的压水反应堆,每秒约产生10²²个电子反中微子,在距离反应堆较近的位置进行探测能显著降低探测难度。

加速器中微子主要来自于π介子的衰变,高能电子或质子对撞时产生不稳定的π介子,会很快衰变成缪子,缪子寿命很短,约2 μs后衰变成电子以及2个中微子。中国提出的加速器中微子束流产生方案如图3^[18],加速器中微子能量较高,方向性好,通常用来进行中微子质量顺序测量以及CP破坏的研究。

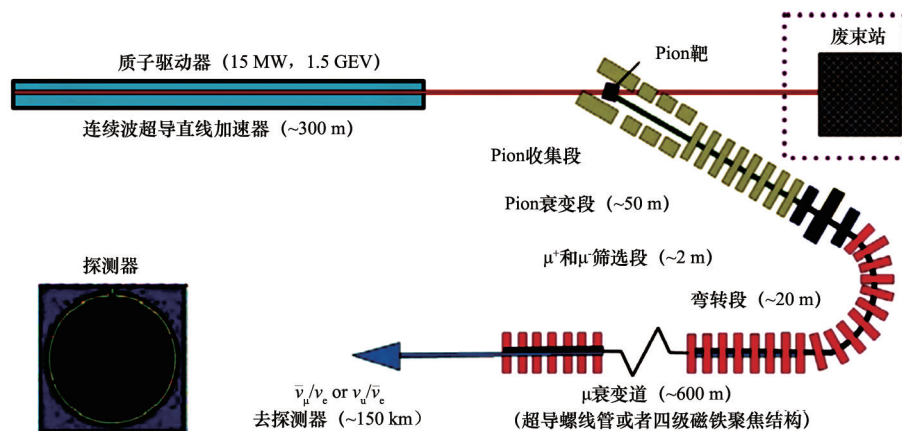


图3 MOMENT实验方案

此外还有来自宇宙中的高能中微子,目前认为其主要来自于恒星爆炸、类星体耀斑等高能天体的活动。

1.2 中微子探测原理

中微子与物质相互作用过程因能量高低而存在差异,目前的小型中微子探测器均针对地球中微子、反应堆中微子研制,反应堆中微子探测原理主要有:(1)中微子在质子上俘获,生成1个正电子和1个中子,也叫反 β 衰变(inverse beta decay, IBD),这是最常用的探测方式,正电子与负电子湮没放出2个反向的0.5 MeV光子形成快信号,中子经过慢化吸收放出若干个光子形成慢信号,通过快慢信号符合可准确测量反电子中微子。(2)中微子在电子上散射,反应截面比IBD小几倍,而且很难跟本底分开,只有几个测量中微子磁矩的实验采用。(3)中微子与原子核发生相干散射过程,中微子是一次与原子核内所有核子发生散射,根据量子力学,反应的振幅等于所有核子相加,因此正比于核子数,而反应的截面是振幅的平方,也就是正比于核子个数的平方。

2 小型中微子探测器研究进展

目前世界上对低能中微子的探测主要利用IBD反应和CE ν NS反应,探测器一般为固体或液体闪烁体。

2.1 基于IBD的液体闪烁体探测器

2007年,Sowden等联合公布了由美国圣地亚国家实验室和劳伦斯利弗摩尔国家实验室联合开展的利用反中微子监测反应堆运行的实验结果,证明了通过测量反应堆中微子通量和能谱监测反应堆运行状态的可行性,并首次公布了一款小型中微子探测器SONGS1(图4)^[19]。

韩国在中微子探测器方面主要采用掺钆液体闪烁体,通过减少闪烁体的用量来减小探测器体积重量,例如重约16 t的RENO探测器^[20],2017年,韩国的NEOS实验公布了一款基于液体闪烁体研制的小型中微子探测器(图5)^[21],并且尝试了利用小型中微子探测器进行反应堆监测^[22]。

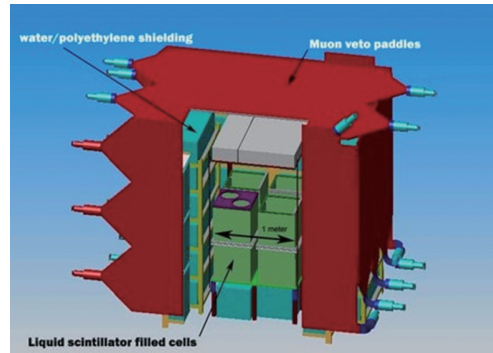


图4 SONGS1探测器

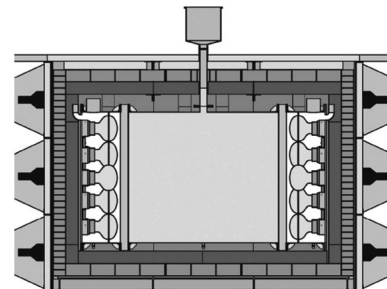
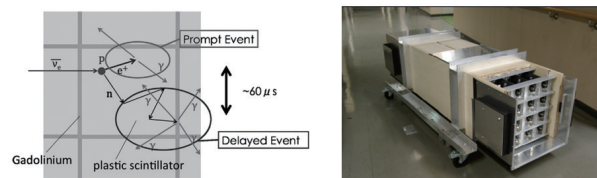


图5 NEOS探测器

液体闪烁体由于核密度较低,不利于提高IBD反应探测效率,且探测器不易分割成较小的探测单元,只有少数的试验采用,但液体闪烁体成本较低,世界上现有大型中微子探测器大多采用液体闪烁体^[3-4]。

2.2 基于IBD的固体闪烁体探测器

2012年,日本提出用塑料闪烁体建造小型移动式反应堆中微子探测器^[23-25],作为反应堆的辅助监测措施,并取名为PANDA,该探测器为网格化设计,原理样机名为lesser PANDA(图6)^[26],后于2014年更新了PANDA的配置^[27],主要是探测器模组由16组增加到36组,并且更新了触发和算法。

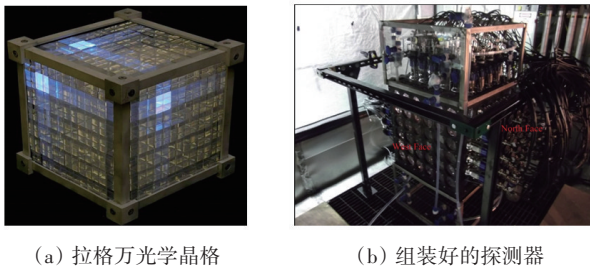


(a) 探测原理

(b) 16单元组成的原理样机

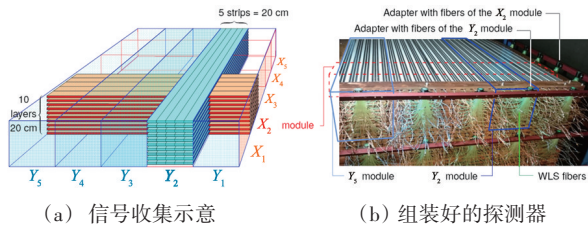
图6 lesser PANDA探测器

2015年,美国的弗吉尼亚理工大学、夏威夷大学、约翰霍普金斯大学等组成的研究团队公布了一款名为NuLat的中微子探测器(图7)^[28]。



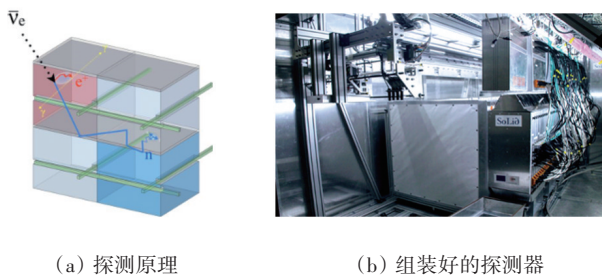
(a) 拉格万光学晶格 (b) 组装好的探测器
图7 NuLat探测器

2016年,俄罗斯提出一套名为DANSS的探测器(图8)^[29],基于高度网格化的聚乙烯固体塑料闪烁体制成,共有2500根尺寸为1 cm×4 cm×100 cm闪烁体条,表面为掺钷的俘获体,多层二维读出,为提高事例率而采用了编码读出,整套系统探测效率极高。



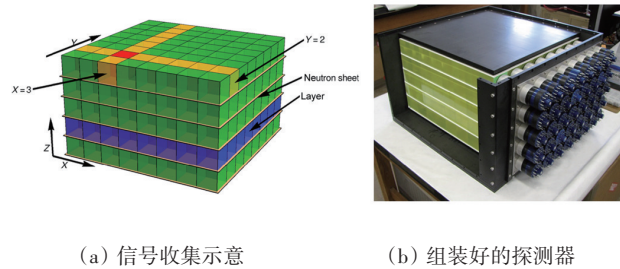
(a) 信号收集示意 (b) 组装好的探测器
图8 DANSS探测器组成

2017年,英国的SoLid实验提出了一款以聚乙烯甲苯(PVT)塑料闪烁体为基础,⁶LiF:ZnS闪烁体作为中子俘获体的小型中微子探测器(图9)^[30],得益于优化的探测器材料及几何结构设计,SoLid可实现高于常见掺钷液体闪烁体上百倍的探测效率,并且在反应堆运行管理上实现了良好的效果^[31]。



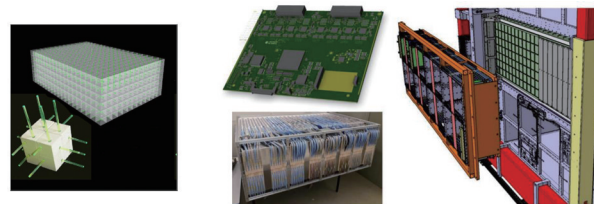
(a) 探测原理 (b) 组装好的探测器
图9 SoLid实验探测器

2020年,佛吉尼亚大学公布了一款名为MiniCHANDLER的塑料闪烁体探测器(图10)^[32],技术路线与NuLat差不多,重量下探到80 kg,在距离3 GW的反应堆25 m的地方可实现4/h的计数率。



(a) 信号收集示意 (b) 组装好的探测器
图10 MiniCHANDLER探测器

2020年,欧洲核子研究中心(CERN)公布了其中微子探测器领域的最新研究成果——基于3D打印的网格化塑料闪烁体中微子探测器SuperFGD(图11)^[33],该探测器由无数个1 cm³塑料闪烁体组成,探测器外面覆盖的时间投影室可测出质子的四动量,进而可对中微子反应进行精确重建。



(a) SuperFGD概念模型 (b) 组装好的探测器
图11 SuperFGD探测器

各个探测器参数对比如表1所示,为了提高中微子探测效率,探测器网格化程度越来越高,新材料、新结构、新读出方式不断出现,基于IBD反应的探测器大多采用固体塑料闪烁体,单位重量的中微子探测效率可高于1/(h·t⁻¹)。

2.3 基于CEvNS的探测器

在CEvNS方面,自从Freedman等^[34]于20世纪70年代预言了CEvNS的存在之后,早期的CEvNS实验均类似于暗物质探测实验,一是由于CEvNS截面依然太小,二是CEvNS不像IBD反应可以进行符合测量排除本底,导致本底噪声复杂且难以去除。

2007年,Barbeau等^[35]报道了其开展的CEvNS实验进展,实验点位于美国San Onofre Nuclear Generating Station 3号反应堆30 m处,采用P型点接触式高纯锗探测器,探测器外部包裹缪子本底排除探测器、屏蔽体等,此后中国台湾的TEXONO实验(Taiwan Experiment on Reactor Neutrino)^[36-37]、日

表1 各探测器性能对比

探测器	国家	重量/体积	反应堆功率	探测能力	IBD反应基体	探测单元	特点
SONGS1	美国	3 t	3 GW	距离反应堆 24 m处400/d	掺钷液体闪烁体	4	包含反符合屏蔽系统
NEOS	韩国	1008 L	3 GW	距离反应堆 24 m处1976/d	掺钷液体闪烁体	1	包含反符合屏蔽系统
PANDA	日本	360 kg	3 GW	距离反应堆 30 m处400/d	塑料闪烁体, 钷薄片	36	二维读出
NuLat	美国	1 t	—	—	Raghavan Optical Lattice, ^6LiF 闪烁体	320	延迟信号排除 本底, 三维读出
DANSS	俄罗斯	1 t	3 GW	距离反应堆 12 m处5000/d	聚乙烯固体塑料闪烁体, 掺钷中子俘获体	2500	多层二维读出, 信号编码读出
SoLid	英国	1.6 t	60 MW	—	聚乙烯甲苯, ^6LiF : ZnS 闪烁体	12800	二维读出
MiniCHA NDLER	美国	80 kg	3 GW	距离反应堆 25 m处4/h	Raghavan Optical Lattice, ^6LiF 闪烁体	320	延迟信号排除 本底, 三维读出
SuperFGD	瑞士	—	—	—	聚苯乙烯, 对三联 苯, 二苯基吡唑苯	无数个 1cm^3 独立单元	3D 打印, 三维 读出

本的 XMASS 实验^[38-40]、美国的 MINER 实验 (Mitchell Institute Neutrino Experiment at Reactor)^[41]、德国的 CONUS 实验 (COherent elastic NeUtrino nucleus Scattering)^[42]、美国的 COHERENT 实验^[43-44]等均对 CEvNS 进行了探索, 大部分工作均是在分析本底, 因为只有完全弄清了本底才能挑出稀有的 CEvNS 事例, COHERENT 合作组^[45]于 2017 年利用 14.6 kg 的 CsI(Na) 探测器首先发现了 CEvNS 反应, 此后又对 CEvNS 的性质进行了研究^[46-47], 但 CEvNS 的探测效率依然很难提升。

3 结论

目前提出的小型中微子探测器主要基于 IBD 反应进行开发, 其拥有较大的反应截面、噪声本底处理相对较容易、研究比较成熟, 基于 CEvNS 的探测技术近年来取得了很大突破, 但由于噪声本底复杂, 对低能中微子探测效率优势不明显。

由于中微子能量较低, 宇宙线、探测器本身以及周围物质的放射性都会带来大量本底, 包括宇宙线缪子及其次生粒子、天然中子及光子放射性等, 目前的解决方式是通过在探测器表面覆盖铅、水、

聚乙烯等进行屏蔽, 但对于缪子效果不佳, 需要采取符合测量进行排除, 可使本底噪声达到可接受的水平, 为了提高探测能力, 后续可针对不同本底来源进行模拟研究, 并采取智能算法对数据进行训练、清洗, 进一步提高本底排除能力, 同时还需对探测器结构及数据获取进行进一步优化。

传统的中微子探测器体积庞大、难以移动, 通过合理的材料组分、结构设计, 中微子探测器的重量也能降到数吨以内, 对于核反应堆监测、潜艇通信、地球物理研究等具有潜在应用价值, 美国、俄罗斯、欧盟等传统核大国(地区)对小型中微子探测器研究较多, 均研制出了原型机, 并进行了一定的应用测试, 日本、韩国、中国台湾地区也开展了大量研究, 取得了一定成效, 总体来看中国目前处于“陪跑”阶段, 精力也主要集中在大科学装置研究上, 对于小型探测器研究投入不足, 中国科学院高能物理研究所前期开展过基于两相液氙的无中微子 β 衰变探测原理样机研制, 但未见相关成果公开, 上海交通大学牵头的 PandaX 实验主要用于暗物质研究, 没有中微子相干散射的结果报道, 四川大学在高效中子光子联合测量方面有一些积累^[48-50], 为了在先进探测技术领域站稳脚跟, 同时带动相关产业

发展,中国需要开发具有自主知识产权的小型中微子探测器,以保持核技术应用方面的优势地位。

参考文献(References)

- [1] Cowan C L, Reines F, Harrison F B, et al. Detection of the free neutrino: A confirmation[J]. *Science*, 1956, 124(3212): 103–104.
- [2] Akimov D, Albert J B, An P, et al. Observation of coherent elastic neutrino–nucleus scattering[J]. *Science*, 2017, 357: 1123–1127.
- [3] 王贻芳, 大亚湾反应堆中微子实验[J]. *物理*, 2007, 36(3): 207–214.
- [4] JUNO Collaboration. Status and prospects of the JUNO experiment[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2017, 888: 012022.
- [5] Korovkin V A, Kodanev S A, Panashchenko N S, et al. Measuring nuclear plant power output by neutrino detection[J]. *Atomic Energy*, 1988, 65(3): 712–718.
- [6] Klimov Y V, Kopeikin V I, Mikaélyan L A, et al. Neutrino method remote measurement of reactor power and output[J]. *Atomic Energy*, 1994, 76(2): 123–127.
- [7] 孙亚轩, 曹俊, 陆锦标, 等. 反应堆中微子实验的基线优化[J]. *高能物理与核物理*, 2005, 29(6): 543–548.
- [8] 朱剑钰, 徐雪峰, 苏佳杭, 等. 反中微子监测反应堆运行的数值模拟[J]. *核技术*, 2016, 39(3): 63–69.
- [9] IAEA. Final report: Focused workshop on antineutrino detection for safeguards applications[R]. Vienna: IAEA Headquarters, 2008.
- [10] 谢慈, 高俊, 柳超, 等. 中微子对潜艇通信研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(6): 2071–2074.
- [11] 钟鸣. 中微子探测技术的发展及其军事应用前景[J]. *国防科技*, 2019, 40(1): 5–9.
- [12] MINERvA Collaboration. Demonstration of communication using neutrinos[J]. *Modern Physics Letters A*, 2012, 27: 1250077.
- [13] 韩然, 习宇飞. 地球中微子——把脉地球内部热量[J]. *现代物理知识*, 2015, 27(6): 43–46.
- [14] 韩然, 牛耀龄, 李玉峰, 等. 地球中微子: 来自地球深部的信使[J]. *科学通报*, 2018, 63(27): 2853–2862.
- [15] 何锦成, 韩然, 欧阳晓平. 基于江门地下中微子实验的地球中微子信号研究[J]. *航天器环境工程*, 2018, 35(2): 158–164.
- [16] 冒鑫, 韩然, 李玉峰. 地球中微子能谱计算及初步高阶修正[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(8): 1345–1354.
- [17] Carlo B, Giorgio G, Petr V. Reactor-based neutrino oscillation experiments[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74: 297–328.
- [18] Song Y P, Jing H T, Tang J Y, et al. Design study of pion and muon beam transport line for MOMENT[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2020, 950: 162907.
- [19] Bowden N, Bernstein A, Allen M, et al. Experimental results from an antineutrino detector for cooperative monitoring of nuclear reactors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2007, 572: 985–998.
- [20] Joo K K. Status of the RENO reactor neutrino experiment[J]. *Nuclear Physics B*, 2012, 229–232: 97–100.
- [21] Ko Y J, Kim B R, Kim J Y, et al. Sterile neutrino search at the NEOS experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118: 121802.
- [22] Kim Y. Detection of antineutrinos for reactor monitoring[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2016, 48: 285–292.
- [23] Kuroda Y, Oguri S, Kato Y, et al. A mobile antineutrino detector with plastic scintillators[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, 690: 41–47.
- [24] Vogel P, Engel J. Neutrino electromagnetic form factors[J]. *Physical Review D*, 1989, 39(11): 3378–3383.
- [25] Mueller T A, Lhuillier D, Fallot M, et al. Improved predictions of reactor antineutrino spectra[J]. *Physical Review C*, 2011, 83(5): 054615.
- [26] Huber P. On the determination of antineutrino spectra from nuclear reactors[J]. *Physical Review C*, 2011, 84(2): 024617.
- [27] Oguri S, Kuroda Y, Kato Y, et al. Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, 757: 33–39.
- [28] Lane C, Usman S M, Blackmon J, et al. A new type of neutrino detector for sterile neutrino search at nuclear reactors and nuclear nonproliferation applications[J]. *arXiv Preprint*, 2015, arXiv: 1501.06935.
- [29] Alekseev I, Belov V, Brudanin V, et al. DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on solid scintillator[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 11: P11011.
- [30] Abreu Y, Amhis Y, Arnold L, et al. A novel segmented-scintillator antineutrino detector[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12: P04024.
- [31] Carroll J, Coleman J, Lockwood M, et al. Monitoring re-

- actor anti-neutrinos using a plastic scintillator detector in a mobile laboratory[J]. arXiv Preprint, 2018, arXiv: 1811.01006v1.
- [32] Haghghat A, Huber P, Li S, et al. Observation of Reactor Antineutrinos with a rapidly deployable surface-level detector[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13: 034028.
- [33] Blondel A, Bogomilov M, Bordoni S, et al. The SuperF-GD prototype charged particle beam tests[J]. arXiv Preprint, 2020, arXiv: 2008.08861v2 .
- [34] Freedman D Z, Schramm D N, Tubbs D L. The weak neutral current and its effects in stellar collapse[J]. *Annual Review of Nuclear And Particle Science*, 1977, 27: 167–207.
- [35] Barbeau P S, Collar J I, Tench O. Large-mass ultralow noise germanium detectors: Performance and applications in neutrino and astroparticle physics[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2007, 9(9): 1–7.
- [36] Singh V, Wong H T. Recent results and status of TEXONO experiments[J]. arXiv Preprint, 2004, arXiv: nucl-ex/0412057v1.
- [37] Singh M K, Sharma V, Singh L, et al. Background rejection of TEXONO experiment to explore the sub-keV energy region with HPGe detector[J]. *Indian Journal of Physics*, 2017, 91(10): 1–15.
- [38] Abe K, Hiraide K, Ichimura K, et al. A measurement of the scintillation decay time constant of nuclear recoils in liquid xenon with the XMASS-I detector[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13: P12032.
- [39] Abe K, Hiraide K, Ichimura K, et al. Improved search for two-neutrino double electron capture on ^{124}Xe and ^{126}Xe using particle identification in XMASS-I[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2018, 053D03.
- [40] Abe K, Chen Y, Hiraide K, et al. Search for exotic neutrino-electron interactions using solar neutrinos in XMASS-I[J]. *Physics Letters B*, 2020, 809(135741): 1–7.
- [41] Agnolet G, Baker W, Barker D, et al. Background studies for the MINER coherent neutrino scattering reactor experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2017, 853: 53–60.
- [42] Hakenmüller J, Buck C, Fülber K, et al. Neutron-induced background in the CONUS experiment[J]. *European Physical Journal C*, 2019, 79(699): 1–27.
- [43] Akimov D, An P, Awe C, et al. The COHERENT experiment at the spallation neutron source[J]. arXiv Preprint, 2016, arXiv: 1509.08702v2.
- [44] Tayloe R. The CENNS-10 liquid argon detector to measure CEvNS at the Spallation Neutron Source[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 13: C04005.
- [45] Akimov D, Albert J B, An P, et al. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering[J]. *Science*, 357(6356): 1123–1126.
- [46] Akimov D, Albert J B, An P, et al. First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon[J]. *Physical Review D*, 2019, 100: 115020.
- [47] Akimov D, An P, Awe C, et al. Sensitivity of the COHERENT experiment to accelerator-produced dark matter[J]. *Physical Review D*, 2020, 102: 052007.
- [48] Fan X, Yang C W, Wang Z H, et al. Geant4 analysis and optimization of a double crystal phoswich detector for beta-gamma coincidence detection[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2018, 29(4): 59.
- [49] Li X B, Wang Y D, Zhou R, et al. Energy calibration for plastic scintillation detectors based on Compton scatterings of gamma rays[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12: P12025.
- [50] Wang Y D, Li X B, Yang C W, et al. Comparison of two spectrum-dose conversion methods based on NaI(Tl) scintillation detectors[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13: T06004.

Progress in research of small neutrino detectors

HUANG Qianming, LI Lan, LÜ Huanwen, YING Dongchuan

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

Abstract Small neutrino detectors have a wide range of application prospects in reactor monitoring, submarine detection and geophysics research. This paper summarizes the types of neutrinos and detection principles, followed by the development status of detection technologies at home and abroad, including experiments based on inverse beta decay and coherent scattering experiments of neutrinos. Finally, the development of small neutrino detectors is reviewed and differences between different countries and the future development of small neutrino detectors in China are also summarized.

Keywords small neutrino detector; IBD; CEvNS; geophysics; reactor monitoring ●



(责任编辑 王志敏)