



国际中微子与原子核相干散射实验研究及CDEX-RECODE实验

梁艺帆, 杨丽桃*, 岳骞*

清华大学工程物理系, 北京 100084

*联系人, 杨丽桃, E-mail: yanglt@mail.tsinghua.edu.cn; 岳骞, E-mail: yueq@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2024-09-29; 接受日期: 2024-11-05; 网络出版日期: 2025-03-10

国家自然科学基金(编号: 12005111, 12175112, 12322511)和国家重点研发计划(编号: 2022YFA1605000)资助项目

摘要 中微子-原子核相干弹性散射(CEvNS)是标准模型中一种基本的中微子-物质相互作用. 在该相互作用中, 原子核作为一个整体与中微子发生弹性散射. CEvNS探测实验将帮助研究人员检验标准模型和研究超越标准模型的新物理. CEvNS探测还可能成为实时监测反应堆功率和探测太阳与超新星中微子的新方法. 此外, CEvNS 将会成为下一代暗物质直接探测实验的重要本底来源. 因此, CEvNS探测已成为近年来中微子物理领域的一个重要前沿课题, 国际上有大量的CEvNS探测实验正在运行或建设中. 但是, CEvNS极低的截面对CEvNS探测器的阈值和本底提出了极高的要求. 中国的CDEX-RECODE实验是一个基于高纯锗探测器的反应堆中微子CEvNS探测实验, 实验将在中国浙江三门核电站进行. CDEX-RECODE实验预计将拥有大约160 eVee (1 keVnr)的能量阈值、小于2 cpkcd的低能区本底和极好的长时间稳定性, 在同类型实验中拥有较大的优势. 本文介绍了国际上CEvNS探测实验的现状, 并对中国的CDEX-RECODE实验的未来进行了展望.

关键词 中微子-原子核相干弹性散射, 反应堆中微子, CDEX-RECODE实验, 高纯锗探测器

PACS: 95.55.Vj, 29.40.WK, 25.30.Pt

1 引言

中微子-原子核相干弹性散射(Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering, CEvNS)^[1]是标准模型(Standard Model, SM)下中微子与原子核的一种基本相互作用. 当中微子能量较低($E_\nu \lesssim 100$ MeV)时, 它是中微子与原子核之间的主要相互作用. 在该相互作用中, 中微子通过电弱中性流过程(Electroweak Neu-

tral Current Process)与原子核中所有的核子发生相干相互作用(Coherent Interaction), 这使得原子核作为一个整体和中微子发生弹性散射. 如式(1)所示, 该相互作用不会产生新的粒子, 但中微子的一部分动能将会转变为原子核的反冲动能. 在标准模型下, CEvNS的截面极小, 且大约和原子核中子数的平方成正比, 对于碳原子核, CEvNS的截面约为 10^{-38} cm²^[1,2]. 此外, 与其他非相干的过程相比, CEvNS的截面与中微子的能

引用格式: 梁艺帆, 杨丽桃, 岳骞. 国际中微子与原子核相干散射实验研究及CDEX-RECODE实验. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111008
Liang Y F, Yang L T, Yue Q. International survey of coherent elastic neutrino-nucleus scattering experiments and the CDEX-RECODE experiment (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111008, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0419

量几乎是无关的^[1].

$$\nu + A(Z, N) \rightarrow \nu + A(Z, N). \quad (1)$$

CEvNS探测已成为近年来中微子物理领域的重要前沿课题. 相对于反贝塔衰变(Inverse Beta Decay, IBD)这一传统的中微子探测方式, CEvNS的散射截面更大^[1-3], 且没有中微子能量阈值限制^[3,4], 有助于实现中微子探测器的小型化和低能标下标准模型的检验. CEvNS探测不但能够帮助研究人员检验标准模型和研究超越标准模型的新物理^[5-24], 还可能成为反应堆功率的实时监测^[25-27]和太阳与超新星中微子探测^[28-33]的新方法. 而在暗物质直接探测领域, CEvNS探测同样是一个十分重要的研究课题. 基于弱相互作用理论的暗物质直接探测实验中的中微子本底主要来源于太阳和大气中微子的CEvNS相互作用, 故CEvNS探测能够帮助研究人员确定实验的中微子本底, 以探测截面在 10^{-49} – 10^{-45} cm²之间的大质量弱相互作用暗物质粒子(Weakly Interacting Massive Particle, WIMP)^[34,35].

如前文所述, 在中微子和原子核发生CEvNS相互作用后, 中微子的一部分动能将会转变为原子核的反冲动能, 这一特点让CEvNS事例在理论上能够被半导体探测器和闪烁体探测器等辐射探测器所探测到. 但由于CEvNS的截面极小, CEvNS探测对探测器的灵敏度有着非常高的要求, 探测器需要在低阈值情况下拥有极低的本底. 为了满足这个要求, 研究人员不但需要为探测器添加足够厚的被动屏蔽层, 还可能需要用反符合探测器进行主动屏蔽, 从而筛去宇宙线中的缪子等难以屏蔽的粒子在探测器内所产生的信号. 此外, 来自探测器本身的本底也应该足够低, 这对探测器的制作工艺提出了较高要求. 而在信号处理层面, 研究人员也需要开发出拥有较强的甄别能力和较高的甄别效率的信号甄别方法, 实现CEvNS信号和本底信号的高效甄别, 从而进一步降低探测器的本底. 由于CEvNS探测实验对探测器灵敏度的极高要求, CEvNS直到2017年才首次在实验中被探测到, 这距离它首次在理论上被预言已经过去了43年^[1,8].

近年来国际上的CEvNS探测实验可根据其所用的中微子源的类型分为三大类, 分别为 π^+ 介子衰变中微子CEvNS探测实验、反应堆中微子CEvNS探测实验和地外中微子CEvNS探测实验. 本文将分别介绍这三类CEvNS探测实验在国际上的发展现状, 并对中国的

CDEX-RECODE (China Dark Matter Experiment-Reactor Neutrino Coherent Scattering Detection Experiment)实验的未来进行展望.

2 π^+ 介子衰变中微子CEvNS探测实验

π^+ 介子是一种寿命极短的基本粒子, 它的半衰期仅为26 ns. 在静止状态下, π^+ 介子将会衰变为一个 μ^+ 介子和一个能量为29.8 MeV的缪子中微子. 其中, μ^+ 介子的半衰期为2.2 μ s, 它将会衰变为一个电子中微子、一个正电子和一个反缪子中微子, 这三个粒子的能量之和为52.8 MeV. 故 π^+ 介子及其衰变产物在静止衰变过程中共计会释放出一个缪子中微子、一个电子中微子和一个反缪子中微子, 且它们的能量均不会超过100 MeV. 因此, 研究人员可以通过使用高能质子束轰击特定的靶物质等方式来制造 π^+ 介子, 从而生成CEvNS探测实验所需要的能量低于100 MeV的中微子^[36].

COHERENT实验、CCM实验和vESS实验均选择对 π^+ 介子的静止衰变所产生的中微子的CEvNS信号进行探测(如表1). 其中, COHERENT实验已先后在CsI[Na]探测器和液氩探测器上实现了CEvNS信号的直接探测^[8,18,24].

2.1 COHERENT实验

COHERENT实验是世界上首个直接探测到CEvNS信号的实验^[8]. 该实验在美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)的散裂中子源(Spallation Neutron Source, SNS)上进行. 在该实验中, 研究人员用散裂中子源发出的高能脉冲质子束轰击液态汞靶, 质子束在击中汞靶后将会制造出 π^+ 和 π^- 介子, 大约99%的 π^- 介子被汞靶所吸收, 而 π^+ 介子则会在几个微秒内通过衰变释放出实验所需的中微子. 质子束的能量约为1 GeV, 功率约为1.4 MW, 脉冲的频率为60 Hz, 宽度为1 μ s. 通过该方法制造出的中微子在距离汞靶20 m处的总流强约为 4.7×10^7 v cm⁻² s⁻¹^[37].

为了测量中微子和不同质量的原子核的CEvNS相互作用截面, 实验使用包括CsI[Na]探测器、液氩探测器、高纯锗探测器和NaI[Tl]探测器在内的多种探测器对中微子的CEvNS信号进行探测. 实验所使用的各个CEvNS探测器被依次放置在散裂中子源附近的一条“中微子走廊”上, “中微子走廊”与散裂中子源发出的

质子束基本平行, 与汞靶的距离为19.2 m. 这条“中微子走廊”拥有8 m等效水深(Meter Water Equivalent, MWE)的宇宙线屏蔽层, 其与汞靶之间为混凝土填充物, 会屏蔽散裂中子源所产生的中子.

2.1.1 CsI[Na]探测器

在COHERENT实验中, CsI[Na]探测器是首个实现CEvNS信号的直接探测的探测器^[8,18]. 该探测器是一个CsI[Na]闪烁体探测器, 其闪烁体为圆柱形, 直径为4.7 cm, 长度为34 cm, 质量为14.6 kg, 被放置在一个电铸铜外壳内. 探测器的能量阈值为6.5 keVnr (kilo electron Volt nuclear-recoil), 光产额约为13.4 pe (photo-electron)/keVee (kilo electron Volt electron equivalent). 探测器周围的屏蔽体由内到外依次为7.5 cm厚的高密度聚乙烯、5 cm厚的低本底铅、10 cm厚的普通铅、缪子反符合探测器和大于9 cm厚的水屏蔽体. 该探测器被放置在距汞靶19.3 m处, 该处的中微子流强约为 $5.0 \times 10^7 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

2017年, 经过15个月的取数, 研究人员在该探测器上成功探测到了CEvNS信号, 其显著度为 6.7σ , 这是人类首次实现CEvNS信号的直接探测^[8]. 该轮实验共探测到了 134 ± 22 个CEvNS事例, 与标准模型理论预测的 178 ± 48 个的一致性水平为 1σ . 此外, 该实验的结果还对包括超标准模型夸克-电子矢量耦合相互作用、中微子磁矩和惰性中微子在内的多种超出标准模型的中微子物理给出了新的限制^[8-17].

2020年, 研究人员公布了CsI[Na]探测器的新一轮

取数实验的结果^[18]. 该轮取数共探测到 306 ± 20 个CEvNS事例, 与标准模型理论预测的 341 ± 11 (理论误差) ± 42 (实验误差)个的一致性水平为 1σ , CEvNS信号的显著度提升至 11.6σ , 测得中微子与CsI的平均CEvNS截面为 $165^{+30}_{-25} \times 10^{-40} \text{ cm}^2$, 并对包括超标准模型夸克-电子矢量耦合相互作用(如图1^[18,24,38])、中微子磁矩和惰性中微子在内的多种超出标准模型的中微子物理给出了更严格的限制^[18-23].

2.1.2 液氩探测器

在COHERENT实验中, 液氩探测器是第二个实现CEvNS信号的直接探测的探测器^[24,39,40]. 实验所用的液氩探测器称为CENNS-10, 它是一个单相液氩闪烁体探测器, 所用液氩的⁴⁰Ar丰度为99.6%, 总灵敏质量约为24 kg. 探测器被放置在距汞靶27.5 m处, 该处的中微子流强约为 $2.5 \times 10^7 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 该探测器的能量阈值为20 keVnr, 光产额约为4.5 pe/keVee. 探测器周围的屏蔽体由内到外依次为230 mm厚的水、12 mm厚的铜和100 mm厚的铅.

2021年, 研究人员在CENNS-10上探测到了CEvNS信号, 其显著度超过 3σ ^[24]. 实验测得中微子与⁴⁰Ar的CEvNS截面为 $(2.2 \pm 0.7) \times 10^{-39} \text{ cm}^2$. 研究人员联合分析了该实验的结果和CsI[Na]实验的结果, 进一步提升了对中微子超标准模型有效作用的限制(如图1)^[24].

在未来, COHERENT实验还将使用更大质量的液氩探测器来进行更加精确的CEvNS探测. 目前, 研究人

表 1 π^+ 介子衰变中微子CEvNS探测实验

Table 1 π^+ decay neutrino CEvNS detection experiments

实验名称	探测器类型	探测器质量	探测器阈值	中微子源	与中微子源的距离 (m)	中微子流强 ($\text{v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	实验地点
COHERENT	CsI[Na]探测器	14.6 kg	6.5 keVnr	散裂中子源 (The Spallation Neutron Source)	19.3	5.0×10^7	美国
	液氩探测器	24/610 kg	20 keVnr		27.5	2.5×10^7	
	高纯锗探测器	18/50 kg	6.7 keVnr		19.2	5.1×10^7	
	NaI[Tl]探测器	185/3388 kg	13 keVnr		25	3.0×10^7	
CCM	液氩探测器	7 t	10–20 keVnr	LANSCE-Lujan Facility	23	3.6×10^5	美国
vESS	高压惰性气体TPC	–	25 eVee	欧洲散裂中子源 (European Spallation Source, ESS)	–	–	欧洲
	纯CsI探测器	50 kg	1 keVee		–	–	
	高纯锗探测器	6 kg	80和100 eVee		–	–	

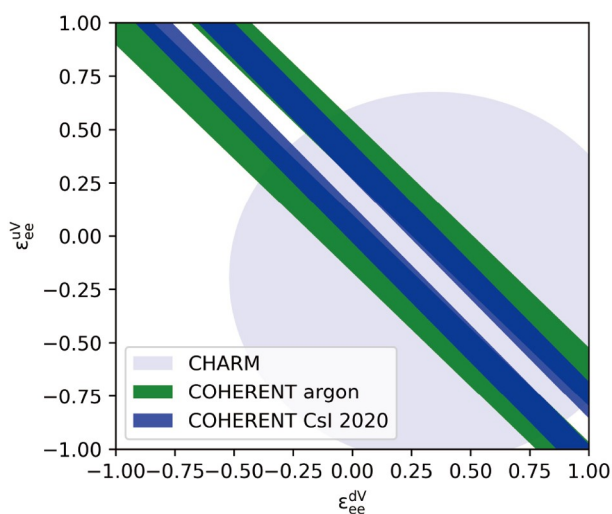


图 1 COHERENT实验使用CsI[Na]^[18]和氩^[24]探测器测量得到的超标准模型夸克-电子矢量耦合相互作用的90%置信度区间与CHARM实验结果^[38]的对比

Figure 1 90% confidence level regions for nonstandard interactions for a vector-coupled quark-electron interaction extracted from COHERENT CsI[Na] [18] and argon [24] measurements plotted together with the CHARM experiment [38].

员正在设计一个被称为COH-Ar-750的新液氩探测器, 该探测器的总液氩质量将为750 kg, 灵敏质量预计约为610 kg, 预计每年将探测到大约3000个CEvNS事例。

2.1.3 高纯锗探测器

高纯锗探测器阵列同样被应用于COHERENT实验中. 实验所用的高纯锗探测器阵列被称为Ge-Mini, 该阵列由8个超过2 kg的P型反向同轴点电极高纯锗探测器组成, 阵列的总晶体质量约为18 kg. 该探测器阵列拥有1.5 keVee (约合6.7 keVnr)的能量阈值和114–152 eVee (Pulser)的能量分辨率. 探测器周围的屏蔽体由内到外依次为铜、聚乙烯、铅和缪子反符合探测器. 探测器阵列距汞靶19.2 m, 该处的中微子流强为 $5.1 \times 10^7 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

未来, 研究人员将对Ge-Mini进行升级, 将其扩展为更大规模的阵列, 该阵列的总晶体质量预计将超过50 kg.

2.1.4 NaI[Tl]探测器

此外, COHERENT实验还使用了NaI[Tl]探测器阵列^[41]. 实验所用的NaI[Tl]闪烁体探测器阵列被称为NaIvE-185, 该阵列由24个质量为7.7 kg的NaI晶体组

成, 阵列的总晶体质量约为185 kg. 其探测阈值约为13 keVnr (3 keVee), 光产额约为40 photons/keVee. NaIvE-185被放置在距汞靶25 m处, 该处的中微子流强约为 $3.0 \times 10^7 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

COHERENT实验计划在未来进行更大规模的基于NaI[Tl]探测器的CEvNS探测实验. 研究人员将使用被称为NaIvETe的吨级NaI[Tl]晶体阵列进行CEvNS探测. 该阵列将包含5–7个模块, 每个模块由63个质量为7.7 kg的NaI晶体组成, 阵列的总晶体质量将达到2.4–3.4 t. 该探测器阵列的屏蔽系统将由钢、铅、水、外层晶体和缪子反符合探测器组成. 根据预测, 该CEvNS探测实验每年将取得超过 3σ 显著度的探测结果.

2.2 CCM实验

CCM实验同样致力于 π^+ 介子衰变中微子的CEvNS探测, 实验在美国的LANSCE-Lujan Facility进行^[42]. 该实验制造中微子的方式与COHERENT实验相似, 研究人员使用能量约为1 GeV、频率为20 Hz, 脉冲宽度为270 ns的脉冲质子束轰击钨靶, 制造出 π^+ 介子, 从而生成实验所需的中微子, 距离钨靶20 m处的中微子总流强约为 $4.74 \times 10^5 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 与COHERENT实验不同的是, CCM仅选择使用液氩探测器来探测CEvNS.

在CCM120实验中, 研究人员使用装有120个PMT的液氩探测器来探测CEvNS. 该探测器总共装载了10 t的液氩, 其中7 t为灵敏质量, 3 t被用于进行反符合测量. 该阶段的实验共探测到294590个物理事例, 但并未成功探测到CEvNS信号.

在下一个阶段的CCM200实验中, 研究人员对液氩探测器进行了升级, 将PMT的数量由120个增加至200个. CCM200实验所使用的液氩探测器预计拥有10–20 keVnr的探测阈值和大约0.5 pe/keVnr的光产额. 该探测器被放置在距钨靶23 m处, 该处的中微子流强约为 $3.6 \times 10^5 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 该阶段的实验目前正在取数中.

2.3 vESS实验

vESS实验是一个正在筹备中的 π^+ 介子衰变中微子CEvNS探测实验, 实验将在位于瑞典的欧洲散裂中子源(European Spallation Source, ESS)进行^[43]. 在vESS

实验中, 研究人员计划在欧洲散裂中子源上使用与 COHERENT 实验和 CCM 实验类似的方法制造中微子. 根据预测, 欧洲散裂中子源每年能够制造出大约 2.53×10^{23} 个中微子, 其中中微子制造能力接近散裂中子源的 10 倍. vESS 实验将使用三种探测器进行 CEvNS 探测, 分别为高压惰性气体 TPC 探测器、纯 CsI 探测器和高纯锗探测器.

高压惰性气体 TPC 拥有方便更换装载气体和阈值极低(约为 25 eVee)的两大优点. vESS 实验将在高压惰性气体 TPC 中分别装载气态的氩、氦和氙, 并对不同装载气体的实验数据进行联合分析, 从而对中微子超标准模型有效作用给出更高精度的限制.

区别于 COHERENT 实验所使用的 CsI[Na] 探测器, vESS 实验计划使用的纯 CsI 探测器将在低温下运行, 且不会进行 Na 的掺杂. 纯 CsI 探测器在低温下的光产额将达到 CsI[Na] 探测器的两倍, 将降至 1 keVee 以下. vESS 实验共计将使用 7 个纯 CsI 晶体, 晶体质量合计约为 50 kg.

vESS 实验还计划使用至少两个质量为 3 kg 的 P 型点电极高纯锗探测器. 其中一个为 Dresden-II 反应堆中微子 CEvNS 探测实验所使用过的高纯锗探测器. 研究人员将会对该探测器进行升级改造, 其能量阈值将会由大约 180 eVee 降低至 100 eVee. 另一个则为正在制造中的新型高纯锗探测器, 该探测器的目标阈值为 80 eVee.

3 反应堆中微子 CEvNS 探测实验

反应堆在运行时, 堆芯内发生的核裂变和贝塔衰变等物理过程会释放出大量的反电子中微子^[25-27,44]. 因此, 部分 CEvNS 探测实验选择以反应堆为中微子源, 使用探测器对反应堆中微子的 CEvNS 信号进行探测.

相比于 π^+ 介子衰变所放出的中微子, 反应堆中微子的流强较大, 大约在 $10^{12} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 量级, 但能量较低, 大约在 MeV 量级, 这对反应堆中微子 CEvNS 探测器的能量阈值和本底提出了较高的要求. 由于反应堆的运行周期较长, 大多数商用反应堆的运行周期在一年以上, 反应堆中微子 CEvNS 探测器还需要拥有较好的长时间稳定性. 此外, 探测器需要被放置在反应堆附近几米至几十米处, 故其应该具备在地面环境下正常运行的能力.

国际上有大量的反应堆中微子 CEvNS 探测实验正在运行或建设中, 包括高纯锗探测器、CCD 探测器、固体闪烁体探测器和液体闪烁体探测器在内的各类 CEvNS 探测器均在这些实验中得到了应用(如表 2). 然而以本文撰写时间为截点, 尚未有实验能够明确探测到反应堆中微子的 CEvNS 信号.

3.1 使用高纯锗探测器的实验

高纯锗探测器是一种由高纯度的锗晶体制成的半导体探测器. 在锗晶体内, 中微子和锗原子核发生 CEvNS 作用后, 其损失的部分动能将激发出电子-空穴对. 这些电子和空穴会在电场的作用下发生定向漂移并被电极收集, 从而输出对应的电信号. 高纯锗探测器拥有探测阈值低、能量分辨率高、自身本底低和长期稳定性好等优点. 此外, 相比于液体探测器, 高纯锗探测器的密度高、体积小, 在受限空间中的本底控制上更具优势. 因此, CONUS 实验、nuGeN 实验、Dresden II 实验和 TEXONO 实验均选择使用高纯锗探测器进行反应堆中微子的 CEvNS 探测.

3.1.1 CONUS 实验

CONUS 实验使用了 4 个质量为 0.996 kg 的 P 型点电极高纯锗探测器来对反应堆中微子的 CEvNS 信号进行探测^[45-48]. 4 个探测器的灵敏质量共计为 3.72 kg, 每个探测器的能量分辨率小于 85 eVee (Pulser), 能量阈值大约为 200 eVee. 实验在德国的 Kernkraftwerk Brokdorf 反应堆(KBR)进行, 该反应堆的热功率为 3.9 GWth. 探测器被放置在距反应堆堆芯 17 m 处, 该处的中微子流强为 $2 \times 10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

实验使用了主动屏蔽和被动屏蔽相结合的方式降低本底^[45]. 其中, 主动屏蔽装置为塑料闪烁体反符合探测器, 其主要被用于降低缪致本底. 而被动屏蔽装置则为使用低本底铅、含硼聚乙烯和钢等材料制成的多层屏蔽体, 其能够有效抑制伽马和中子本底. 两套屏蔽装置合计能够将实验的本底降低至 10 cpk/d (count per kg per keVee per day, 每公斤每 keVee 每天的计数)量级, 为无屏蔽情况下的 $1/10^4$.

CONUS 实验于 2024 年发布了其最终的 CEvNS 测量结果^[48]. 在最终的第 5 轮取数中, 实验收集到总曝光量为 426 kg d 的数据. 基于这些数据, 研究人员将反应堆中微子的 CEvNS 信号强度限制至标准模型预测结果

表 2 反应堆中微子CEvNS探测实验

Table 2 Reactor neutrino CEvNS detection experiments

实验名称	探测器类型	探测器质量	探测器阈值	实验本底	反应堆	反应堆功率	与堆芯的距 离 (m)	中微子流强 ($\nu \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	实验地点
CDEX-RECODE	高纯锗探测器	10 kg	160 eVee	2 cpkdd	中国浙江三门核电站	3.4 GWth	7/11/22	$>1.4 \times 10^{13}$	中国
CONUS	高纯锗探测器	3.72 kg	200 eVee	10 cpkdd	Kernkraftwerk Brokdorf反应堆 (KBR)	3.9 GWth	17	2×10^{13}	德国
CONUS+	高纯锗探测器	3.72 kg	150 eVee	<10 cpkdd	Leibstadt反应堆(KKL)	3.6 GWth	20.7	1.45×10^{13}	瑞士
nuGeN	高纯锗探测器	1.4 kg	<250 eVee	50 cpkdd	加里宁核电站(KNPP) 3号反应堆	3.1 GWth	11	4.4×10^{13}	俄罗斯
Dresden-II	高纯锗探测器	2.924 kg	200 eVee	~1000 cpkdd	Dresden-II反应堆	2.96 GWth	10.39	4.8×10^{13}	美国
TEXENO	高纯锗探测器	0.5–1.5 kg	200 eVee	<50 cpkdd	国升核电站	2.9 GWth	28	6.35×10^{12}	中国台湾
RICOCHET	锗半导体探测器和 锌超导体探测器	>1 kg	50–250 eVee	$(9.4 \pm 0.5) \text{ evts}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ kg}^{-1}$	ILL-H7反应堆	58.3 MWth	8.8	1.1×10^{12}	法国
BULLKID	硅和锗KID探测器	1 kg	~100 eV	—	—	—	—	—	—
MINER	硅、锗和Al ₂ O ₃ 探测器	30 kg	10–100 eV	100 cpkdd	TEES核科学中心TRIGA反应堆	1 MWth	2–10	1×10^{12}	美国
CONNIE	硅CCD探测器	50 g	50 eVee	8000 cpkdd	Almirante Álvaro Alberto核电站Angra 2号反应堆	3.95 GWth	30	7.8×10^{12}	巴西
	硅skipper CCD探测器	0.5 g	15 eVee	4000 cpkdd					
vIOLETA	硅skipper CCD探测器	2.5 g	15 eVee	1000 cpkdd	Atucha 2号反应堆	2 GWth	12	1.8×10^{13}	阿根廷
NEON	NaI[Tl]探测器	16.7 kg	0.2 keV	6 cpkdd	Hanbit核电站6号反应堆	2.815 GWth	23.7	$\sim 10^{13}$	韩国
NUCLEUS	CaWO ₄ 探测器	10 g	10 eV	100 cpkdd	Chooz核电站	$2 \times 4.25 \text{ GWth}$	72, 102	1.7×10^{12}	法国
RED-100	双相液氙探测器	100 kg	4.5 SE	$263/\sim 65 \text{ kg d}^{-1}$	加里宁核电站(KNPP) 4号反应堆	3 GWth	19	1.35×10^{13}	俄罗斯
SBC	闪烁气泡室	10 kg	100 eV	—	国家核研究所(Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, ININ) TRIGA Mark III反应堆	1 MWth	3	—	墨西哥
NEWS-G	球形正比计数器	1 kg	100 eVnr	—	—	10 GWth	10	—	—

的两倍以下，并将Lindhard淬灭因子模型中的参数 κ 限制至0.21以下。

CONUS+实验是CONUS实验的下一阶段，该阶段

的实验将继续使用原有的4个P型点电极高纯锗探测器进行反应堆中微子的CEvNS探测。由于Kernkraftwerk Brokdorf反应堆已在2021年底永久停堆，CONUS+实验

将在瑞士的Leibstadt反应堆(KKL)进行. Leibstadt反应堆的热功率为3.6 GWth, 探测器将被放置在距反应堆堆芯20.7 m处, 该处的中微子流强预计为 $1.45 \times 10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 由于研究人员将对原有的高纯锗探测器及其本底屏蔽系统进行升级, CONUS+实验预计将拥有小于50 eVee (Pulser)的能量分辨率, 150 eVee的能量阈值和比CONUS实验更低的本底水平.

3.1.2 nuGeN实验

nuGeN实验同样使用P型点电极高纯锗探测器来探测反应堆中微子的CEvNS信号^[49]. 当前阶段的实验仅使用一个晶体质量为1.4 kg的高纯锗探测器. 该探测器的能量阈值在250 eVee以下, 能量分辨率为102 eVee (Pulser). 实验在俄罗斯的加里宁核电站(KNPP)进行, 探测器被放置于热功率为3.1 GWth的3号反应堆的堆芯下方约11 m处. 由于与堆芯距离很近, 该处的中微子流强很高, 大约为 $4.4 \times 10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 探测器周围的屏蔽体由内至外依次为3D打印尼龙、10 cm厚的高纯无氧铜、8 cm厚的含硼聚乙烯、10 cm厚的铅、8 cm厚的含硼聚乙烯和5 cm厚的缪子反符合探测器. 实验的感兴趣区域(320–360 eVee)本底大约为50 cpkdd. 探测器和屏蔽体被放置在一个特殊的升降装置上, 研究人员能够通过这一装置调节探测器的高度, 从而改变探测器与堆芯的距离. 通过该方法在实验中改变探测器所在位置的中微子流强将有助于降低实验的系统误差.

2023年, nuGeN实验已收集到曝光量超过1200 kg d的实验数据. 虽然实验尚未能够探测到CEvNS信号, 但其结果已将Lindhard淬灭因子模型中的参数 κ 限制至0.26以下^[49].

3.1.3 Dresden-II实验

Dresden-II实验使用一个被称为NCC-1701的高纯锗探测器进行CEvNS探测^[50,51]. NCC-1701是一个晶体质量为2.924 kg的反向同轴P型点电极高纯锗探测器, 其能量阈值为200 eVee, 能量分辨率为154 eVee (Pulser). 实验在美国的Dresden-II反应堆进行, 该反应堆的热功率为2.96 GWth. NCC-1701探测器所在位置与距堆芯中心的距离为10.39 m, 该处的中微子流强高达 $4.8 \times 10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 是目前所有反应堆中微子CEvNS探测实验中最高的. 探测器周围的屏蔽体由内

向外依次为高纯无氧铜端盖、内层塑料闪烁体反符合探测器、2.5 cm厚的低本底铅、12.5 cm厚的普通铅、0.6 mm厚的镅片、底面为2.5 cm厚的含硼聚乙烯和覆盖了其余5面的5 cm厚的外层塑料闪烁体反符合探测器. 实验在200 eVee处的本底大约在1000 cpkdd量级.

2022年, 研究人员宣称, Dresden-II实验曝光量为 $96.4 \text{ d} \times 3 \text{ kg}$ 的数据中存在CEvNS信号成分的可能性非常大($p < 1.2 \times 10^{-3}$), 该实验数据可将反应堆中微子的CEvNS信号强度限制至标准模型预测结果的60%偏差以内^[50].

3.1.4 TEXONO实验

TEXONO实验使用多种类型的高纯锗探测器进行反应堆中微子的CEvNS探测^[52,53]. 实验所用的高纯锗探测器的晶体质量在0.5–1.5 kg, 最低能量阈值约为200 eVee, 能量分辨率约为100 eVee (Pulser). 实验在中国台湾的国升核电站进行, 探测器距反应堆的距离为28 m, 反应堆的功率为2.9 GWth, 探测器所在位置的中微子流强为 $6.35 \times 10^{12} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 探测器周围的屏蔽体由内到外依次为5 cm厚的高纯无氧铜、25 cm厚的含硼聚乙烯、5 cm厚的不锈钢框架、15 cm厚的铅和3 cm厚的反符合塑料闪烁体. 这些屏蔽体帮助实验在亚keV能区获得了低于50 cpkdd的本底.

目前, TEXONO实验已收集到曝光量约为1280 kg d的实验数据, 并将Lindhard淬灭因子模型中的参数 κ 限制至0.158–0.165. 研究人员计划对现有数据进行更加深入的分析, 从而将实验的能量阈值由当前的200 eVee降低至150 eVee. 由于国升核电站已于2023年停止运行, 研究人员计划在中国浙江三门核电站开展新的CEvNS探测实验.

3.2 使用其他固体探测器的实验

除了第3.1节中提到的使用高纯锗探测器的实验外, 还有许多使用其他类型固体探测器的反应堆中微子CEvNS探测实验, 如RICOCHET实验、MINER实验、CONNIE实验和NEON实验等.

RICOCHET实验计划使用合计质量超过1 kg的锗半导体探测器和铟超导体探测器来对反应堆中微子的CEvNS进行探测^[54–56]. 这些探测器的能量阈值预计为50–250 eVee, 热信号能量分辨率预计约为20 eV

(RMS), 电离信号能量分辨率预计约为20 eVee (RMS). 实验将在法国的ILL-H7反应堆进行, 探测器将被放置在热功率为58.3 MWth的反应堆堆芯附近8.8 m处, 该处的中微子流强约为 $1.1 \times 10^{12} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 在50 eV–1 keV的能区内, 实验的核反冲本底预计为 $(9.4 \pm 0.5) \text{ evts}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, 电子反冲本底预计为 $(32.5 \pm 1.7) \text{ evts}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, CEvNS计数率预计约为 $11 \text{ evts}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ kg}^{-1}$.

BULLKID实验计划使用共计约1 kg的硅和锗KID探测器进行反应堆中微子CEvNS信号的探测^[57]. 实验将使用的KID探测器拥有100 eV量级的能量阈值和10 eV量级的能量分辨率.

MINER实验计划使用总质量为30 kg的硅、锗和 Al_2O_3 探测器对反应堆中微子的CEvNS信号进行探测^[58,59]. 这些探测器的阈值约为10–100 eV, 能量分辨率约为7 eV (1σ). 实验在美国的TEES核科学中心进行, 探测器被放置在功率为1 MWth的TRIGA反应堆附近. 由于反应堆的堆芯可以移动, 故探测器距反应堆的距离是可变的, 变化的范围在2–10 m, 探测器所在位置的中微子流强约为 $10^{12} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 该实验在keV以下能区的本底预计约为100 cpkdd.

CONNIE实验则选择使用硅CCD阵列来探测反应堆中微子的CEvNS信号^[60,61]. 实验在巴西的Almirante Álvaro Alberto核电站进行, 探测器与功率为3.95 GWth的Angra 2号反应堆堆芯的距离约为30 m, 所在位置的中微子流强为 $7.8 \times 10^{12} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 该实验在第一轮运行(2016–2018年)中所使用的硅CCD探测器的总灵敏质量为50 g, 能量阈值约为50 eVee, 读出噪声约为 $2e^-$, 在5.9 keVee处的能量分辨率为63 eVee (RMS), 本底约为8000 cpkdd. 在开始于2019年的第二轮运行中, CONNIE实验使用了总灵敏质量为0.5 g的新型skipper CCD探测器来进行CEvNS的探测. 与CCD探测器相比, skipper CCD探测器拥有更低的能量阈值(15 eVee)、读出噪声($0.15e^-$)和本底水平(约4000 cpkdd).

vIOLETA实验同样使用硅skipper CCD探测器来探测反应堆中微子的CEvNS信号^[62,63]. 实验使用的Skipper CCD探测器拥有15 eVee的能量阈值, $0.17e^-$ 的读出噪声和1000 cpkdd的预期本底. 实验在阿根廷的Atucha 2号反应堆附近进行, 该反应堆的功率为2 GWth. 研究人员已经将一个质量为2.5 g的Skipper

CCD探测器放置在距反应堆堆芯12 m处, 该处的中微子流强约为 $1.8 \times 10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

NEON实验选择使用NaI[Tl]探测器进行反应堆中微子CEvNS信号的探测^[64]. 该实验共计使用了16.7 kg的NaI[Tl]闪烁体探测器, 探测器的能量阈值预计为0.2 keV, 光产额为24 pe/keV, 本底为6 cpkdd. 实验在韩国的Hanbit核电站进行, 探测器与功率为2.815 GWth的6号反应堆的距离为23.7 m, 该处的中微子流强大约在 $10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 量级.

NUCLEUS实验将使用 CaWO_4 探测器对反应堆中微子的CEvNS信号进行探测^[65]. 实验计划使用的 CaWO_4 探测器的质量为10 g, 能量阈值为10 eV, 在112 eV处的能量分辨率为5 eV, 实验的预期本底为100 cpkdd. 实验将在法国Chooz核电站进行, 探测器被放置在两个功率为4.25 GWth的反应堆之间, 和两个堆芯的距离分别为72和102 m, 该处的中微子流强预计为 $1.7 \times 10^{12} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3.3 使用非固体探测器的实验

包括液氩探测器、闪烁气泡室和球形正比计数器在内的非固定体探测器同样可以被应用于反应堆中微子的CEvNS探测实验中.

RED-100实验使用一个质量约为200 kg的双相液氩探测器进行反应堆中微子CEvNS信号的探测^[66]. 该探测器的有效质量约为100 kg, 能量阈值约为4.5 SE (Single-ionization Electron), 光产额为 $(27.4 \pm 0.03) \text{ pe/SE}$, 5–6 SE能量区间内的本底共计为 $263/\sim 65 \text{ kg d}^{-1}$. 实验在俄罗斯的加里宁核电站(KNPP)进行, 探测器被放置于热功率为3 GWth的4号反应堆的堆芯下方19 m处, 该处的中微子流强大约为 $1.35 \times 10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

SBC实验计划使用一个被称为SBC-LAr10的闪烁气泡室进行反应堆中微子的CEvNS探测^[67]. 研究人员计划在SBC-LAr10内装载10 kg掺杂了氙的液氩. SBC-LAr10的目标阈值为100 eV, 能量分辨率在keV量级. 实验预计将在墨西哥的国家核研究所(Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, ININ)进行, SBC-LAr10将被放置在功率为1 MWth的TRIGA Mark III反应堆附近, 与可移动堆芯的最短距离为3 m.

NEWS-G实验计划使用球形正比计数器探测反应堆中微子的CEvNS信号^[68]. 研究人员计划在球形正比计数器中装填氩气或Ne基混合气体. 探测器的目标质

量为1 kg, 目标阈值为100 eVnr. 实验预计将在功率为10 GWth的反应堆堆芯附近10 m处进行.

4 CDEX-RECODE实验

CDEX-RECODE实验是一个基于高纯锗探测器的反应堆中微子CEvNS探测实验^[69]. 该实验由清华大学主导的中国暗物质实验(China Dark matter EXperiment, CDEX)合作组设计和开展. 如图2所示, 实验将使用两个独立的高纯锗探测器阵列进行反应堆中微子的CEvNS信号探测, 每个阵列由5个高纯锗探测器单元组成, 每个单元包含一个1 kg的高纯锗探测器、一套支撑结构和一套前端电子学系统. 5个高纯锗单元被放置在同一个真空低温恒温器中, 由一根液氮冷指进行冷却. 两个高纯锗探测器阵列的总有效质量约为10 kg. 实验在反应堆功率为3.4 GWth的中国浙江三门核电站进行. 实验系统将被放置在反应堆安全壳外的地面上(距离堆芯22 m)或反应堆安全壳内(距离堆芯7或11 m), 系统所在位置的中微子流强将大于 $1.4 \times 10^{13} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

如第3节所述, 反应堆中微子CEvNS探测器需要极低的能量阈值、极低的本底和较好的长时间稳定性. 在CDEX实验中, 高纯锗探测器的这三项性能已经得到了很好的验证^[70-73]. CDEX-1B高纯锗探测器的能量阈值约为160 eVee, 低能区本底约为2 cpkcd, 并且已经稳定运行了10年以上^[70-72]. 因此, CDEX-RECODE实验所使用的同类型高纯锗探测器预计也将拥有大约160 eVee (1 keVnr)的能量阈值、小于2 cpkcd的低能区本底和极好的长时间稳定性. 这将为CDEX-RE-

CODE实验带来较大的灵敏度优势.

CDEX-RECODE实验的本底主要由宇宙线、反应堆中子和高纯锗晶体及其周围材料中的放射性同位素产生. 为了减少宇宙线和反应堆中子所产生的本底, 研究人员设计了一个由高纯无氧铜、含硼聚乙烯、铅、聚乙烯和塑料闪烁体缪子反符合探测器组成的屏蔽体系统(如图3). 据估计, 该屏蔽体系统对于宇宙线的反符合效率将超过98%, 并且能够将伽马和中子流强分别降低5个和3个量级. 为了减少探测器周围材料中的放射性同位素所产生的本底, 研究人员对晶体附近的支撑结构进行了轻量化设计, 并计划使用低本底的高纯无氧铜或PTFE支架和低本底、低噪声的前端电子学系统.

CDEX-RECODE实验的系统误差一共有4个来源, 分别为锗反冲核淬灭因子不确定度、反应堆中微子流强不确定度、系统触发效率与事例筛选效率的不确定度和本底模型不确定度. 其中, 锗反冲核淬灭因子的不确定度高达10%–20%, 是该实验的系统误差的主要来源. 其不确定度较高的主要原因为锗反冲核在低能量情况下的淬灭因子尚未被精确测量. 因此, 研究人员计划对低能区(20 keV以下)的锗核淬灭因子进行更精确的测量, 以降低实验的系统误差.

反应堆中微子流强的不确定性对实验的系统误差也有着较大的影响. 由于CDEX-RECODE实验所使用的高纯锗探测器预计拥有160 eVee (1 keVnr)的能量阈值, 实验预计能够探测到能量大于5.8 MeV的中微子. 对于能量在2 MeV以上的反应堆中微子, 其能谱可通过Huber-Mueller模型计算得到^[44,74]. 反应堆中微子主要来自²³⁵U, ²³⁹Pu, ²³⁸U和²⁴¹Pu的裂变, 在反应堆的整

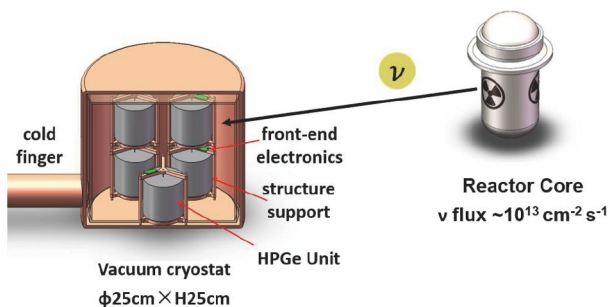


图2 CDEX-RECODE实验高纯锗探测器阵列(图片取自文献^[69], 已获授权. Copyright©2024, the author(s))

Figure 2 High purity germanium detector array of CDEX-RECODE experiment (Reprinted with permission from ref. ^[69]. Copyright©2024, the author(s)).

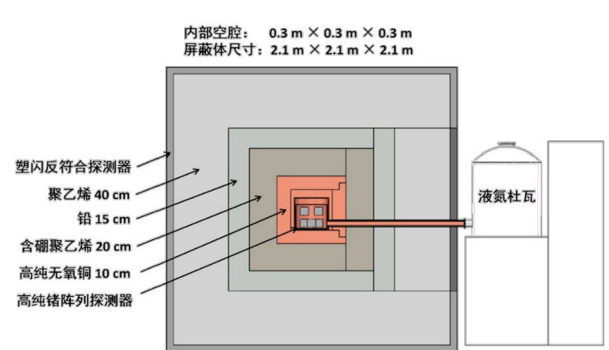


图3 CDEX-RECODE实验屏蔽体系统

Figure 3 Shielding system of CDEX-RECODE experiment.

个燃料周期中, 各个核素的比例会发生变化, 各自贡献的中微子流强也会随之变化, 这导致通过Huber-Mueller模型计算得到的中微子流强存在约3%–5%的不确定度^[44,45,74,75]. 为了降低中微子流强的不确定度, 研究人员计划用两个相同的探测器阵列进行联合测量(如图4). 在实验的第一阶段, 研究人员将把两个阵列放置在与反应堆距离不同但方位相同的两个位置上进行一次共线测量. 在实验的第二阶段, 研究人员将交换两个阵列的位置, 进行另一次共线测量. 在实验的第三阶段, 研究人员将把两个阵列放置在与反应堆距离相同但方位不同的两个位置上进行一次等距测量. 在三个阶段的联合测量后, 研究人员便可借助反应堆中微子流强与距离平方的反比关系降低中微子流强的不确定性所带来的系统误差.

由于高纯锗探测器拥有极高的能量分辨率, 系统触发效率与事例筛选效率的不确定度将会很小, 其对实验系统误差的影响可以忽略. 而本底模型的不确定度同样可以通过三个阶段的联合测量降低. 此外, 在反应堆运行和停堆时分别进行本底测量也可以降低本底模型的不确定度.

CDEX-RECODE实验的现场环境本底测量与估计和各子系统的设计、制作、采购与加工已于2023年开始. 2024年, 研究人员将进行子系统独立测试和联合调

试工作. 实验所使用的两套探测器系统将于2025年被运输至实验现场进行安装、调试和试运行. 随后, 实验将正式开始运行, 进行前文所述的三个阶段的联合测量. 三个阶段的联合测量将分别运行一年, 数据分析和物理分析将在运行期间同时进行. CDEX-RECODE实验预期每千克有效质量每年探测到约500个CEvNS事例, 其能量阈值附近的信噪比预计约为5:1, 这意味着该CEvNS探测实验每天都可以取得超过3个标准差的显著度的探测结果. 在三年的运行后, CDEX-RECODE实验预计将实现反应堆中微子CEvNS的精确测量(预计截面测量精度可达到20%以内), 提升低动量转移下弱混合角的测量精度(预计弱混合角测量精度达到10%以内), 并对中微子超标准模型有效作用给出更高精度的限制(如图5).

5 地外中微子CEvNS探测实验

除了通过质子束打靶制造出的 π^+ 介子和运行中的反应堆堆芯外, 包括太阳和超新星在内的许多地外天体同样能够释放出大量的中微子^[28–33]. 由于地外天体所释放出的中微子流强较低($<10^{12} \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$),

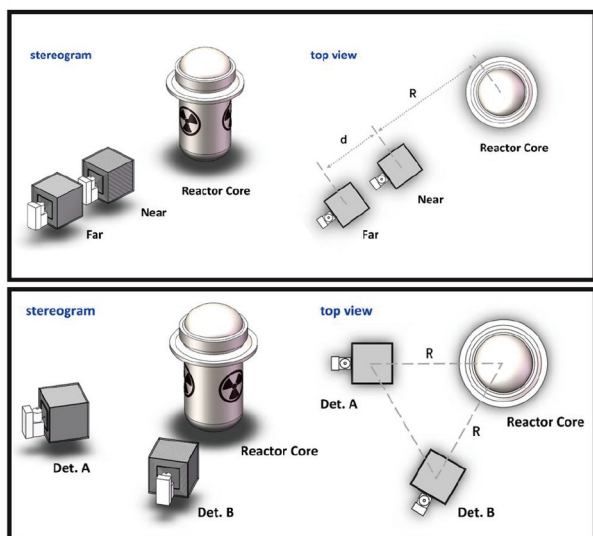


图4 两个探测器阵列的联合测量(图片取自文献[69], 已获授权. Copyright©2024, the author(s))

Figure 4 Joint measurements of two detector arrays (Reprinted with permission from ref. [69]. Copyright©2024, the author(s)).

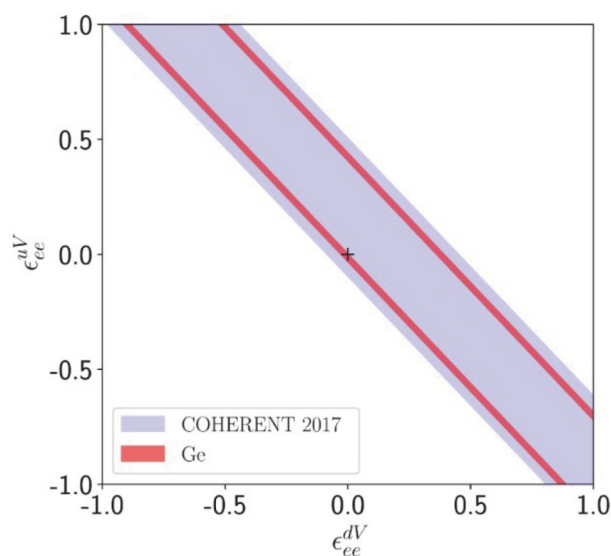


图5 CDEX-RECODE实验使用锗探测器预计测量得到的超标准模型夸克-电子矢量耦合相互作用的90%置信度区间与COHERENT实验结果^[8]的对比

Figure 5 Expected 90% confidence level regions for nonstandard interactions for a vector-coupled quark-electron interaction extracted from the CDEX-RECODE germanium measurement, plotted together with the COHERENT experiment [8].

地外中微子的CEvNS探测实验一般需要拥有极低的本底水平。

由于CEvNS信号和可能的暗物质信号在大多数暗物质直接探测实验所使用的探测器上具有相似的特征,随着暗物质直接探测实验的灵敏度的不断提升,地外中微子的CEvNS信号逐渐成为实验的一个重要本底来源,这也意味着部分暗物质直接探测实验已逐渐开始具备对地外中微子的CEvNS信号进行探测的能力^[28-31,34,35],如CDEX实验、PANDAX实验和XENON实验等(如表3)。

CDEX-50实验是CDEX实验的下一阶段,实验将在中国锦屏地下实验室的二期实验室(CJPL-II)进行^[76,77]。实验将使用5个高纯锗探测器串联,每个串联包含10个高纯锗探测器,总晶体质量约为50 kg。CDEX-50实验在1 keV处的预期本底为0.01 cpkdd,预期阈值为160 eVee, 10.37 keVee处的能量分辨率预计为219 eVee,对自旋无关模型下的WIMP暗物质的探测灵敏度预计将达到 10^{-44} cm^2 。在CDEX-50实验中,太阳中微子的CEvNS信号在0.16–0.5 keVee的能量区间内预计将贡献约 $1.61 \times 10^{-3} \text{ cpkdd}$ 的本底,是本底的主要来源之一。

PANDAX-4T实验使用总灵敏质量为3.7 t的双相氙TPC探测器进行暗物质和太阳中微子CEvNS的探测^[30,31]。实验进行于中国锦屏地下实验室的二期实验室(CJPL-II)。PANDAX-4T实验在进行CEvNS探测时共采集两种信号,分别为闪烁光信号与电离信号的符合信号(配对信号)和非配对的电离信号(US2信号),两种信号的CEvNS探测阈值分别为1.1 keV (配对信号)和0.33 keV (US2信号)。2024年, PANDAX-4T实验发布了最新的测量结果,实验在1.20 t year (配对信号)和1.04 t year (US2信号)的曝光量下于感兴趣区域内分别探测到3个(配对信号)和332个(US2信号)物理事例,其

中 3.5 ± 1.3 个(配对信号)和 75 ± 28 个(US2信号)事例为太阳 ^8B 中微子的CEvNS事例,显著度为 2.64σ ,以此测得太阳 ^8B 中微子的流强为 $(8.4 \pm 3.1) \times 10^6 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,与标准太阳模型下的预期结果相符^[31]。

PANDAX-xT实验是PANDAX实验的下一阶段,实验同样将在中国锦屏地下实验室的二期实验室(CJPL-II)进行^[78]。实验将使用总灵敏质量为43 t的双相氙TPC探测器进行暗物质和太阳中微子CEvNS的探测。PANDAX-xT实验的预期CEvNS探测阈值为1 keV, 2.5 MeV处的能量分辨率预计将小于25 keV (1σ),预期核反冲本底为0.01 cpky (count per kg per year, 每千克每年的计数)。实验预计将在200 t year的曝光量下探测到大约710个太阳 ^8B 中微子的CEvNS事例,对太阳 ^8B 中微子流强的测量精度预计将优于10%。

XENONnT实验使用总灵敏质量为5.9 t的双相氙TPC探测器进行暗物质和太阳中微子CEvNS的探测^[29,79,80]。实验在意大利的Gran Sasso地下实验室进行。实验的核反冲探测阈值为3.3 keV, 2.46 MeV处的能量分辨率为 $(19.7 \pm 0.5) \text{ keV}$,预期核反冲本底为 $(2.2 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{ cpkty}$ (count per ton per keVee per year, 每吨每keVee每年的计数)。实验已于2020年开始取数,预计将在20 t year的曝光量下探测到大约7.61个太阳中微子的CEvNS事例和0.82个大气与超新星中微子的CEvNS事例,在实现太阳中微子的CEvNS信号探测上拥有较大的潜力^[79]。XENONnT实验的最新测量结果已于2024年发布,实验在3.51 t year的曝光量下于感兴趣区域内探测到37个物理事例,其中 $10.7^{+3.7}_{-4.2}$ 个事例为太阳 ^8B 中微子的CEvNS事例,显著度为 2.73σ ,以此测得太阳 ^8B 中微子的流强为 $(4.7^{+3.6}_{-2.3}) \times 10^6 \text{ v cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,与SNO实验的测量结果相符,测得氙的CEvNS截面为 $(1.1^{+0.8}_{-0.5}) \times 10^{-39} \text{ cm}^2$,与标准模型下的预期结果相符^[29]。

表 3 地外中微子CEvNS探测实验

Table 3 Extraterrestrial neutrino CEvNS detection experiments

实验名称	探测器类型	探测器质量	探测器阈值	实验本底	实验地点
CDEX-50	高纯锗探测器	50 kg	160 eVee	0.01 cpkdd	中国锦屏地下实验室
PANDAX-4T	双相氙TPC探测器	3.7 t	1.1 keV (配对) 0.33 keV (US2)	2.50 cpky (配对) 319 cpky (US2)	中国锦屏地下实验室
PANDAX-xT	双相氙TPC探测器	43 t	1 keV	0.01 cpky	中国锦屏地下实验室
XENONnT	双相氙TPC探测器	5.9 t	3.3 keV	$(2.2 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{ cpkty}$	意大利Gran Sasso地下实验室

6 总结

CEvNS是标准模型下中微子与物质的一个基本作用. 近年来, CEvNS的探测已成为中微子物理领域的重要前沿课题. CEvNS探测不但能够帮助研究人员检验标准模型和研究超越标准模型的新物理, 还可能成为反应堆功率的实时监测和太阳与超新星中微子探测的新方法. 地外中微子的CEvNS信号也将成为下一代暗物质直接探测实验的一个重要的本底来源.

根据所使用的中微子源的类型, 近年来国际上的CEvNS探测实验可被分为 π^+ 介子衰变中微子CEvNS探测实验、反应堆中微子CEvNS探测实验和地外中微子CEvNS探测实验三大类. π^+ 介子衰变中微子的CEvNS信号已在COHERENT实验中被成功探测, 但反应堆中微子和地外中微子的CEvNS信号仍未被任何实验所探测到.

高纯锗探测器拥有探测阈值低、能量分辨率高、自身本底低、长期稳定性好和占用空间小等优点, 被

广泛应用于CEvNS探测实验中, COHERENT实验、ESS实验、CONUS实验、nuGeN实验、Dresden II实验和TEXONO实验均使用了高纯锗探测器. 不过以本文撰写时间为截点, 尚未有实验在高纯锗探测器上探测到CEvNS信号.

由中国的CDEX合作组所设计和开展的CDEX-RECODE实验是一个基于高纯锗探测器的反应堆中微子CEvNS探测实验, 实验将在中国浙江三门核电站进行. RECODE实验所用的高纯锗探测器预计将拥有大约160 eVee的能量阈值、大约2 cpkcd的低能区本底和极好的长时间稳定性, 在同类型实验中拥有较大的优势. RECODE实验的子系统测试工作已于2023年开始, 实验预计将于2025年正式开始运行. 在三年的运行后, RECODE实验预计将实现反应堆中微子CEvNS的精确测量, 提升低动量转移下弱混合角的测量精度, 并对中微子超标准模型有效作用给出更高精度的限制.

致谢 感谢CJPL实验室工作人员和中核集团三门核电有限公司对工作的支持. CJPL实验室由清华大学和雅砻江水电开发有限公司联合建设和运行.

参考文献

- 1 Freedman D Z. Coherent effects of a weak neutral current. *Phys Rev D*, 1974, 9: 1389–1392
- 2 Drukier A, Stodolsky L. Principles and applications of a neutral-current detector for neutrino physics and astronomy. *Phys Rev D*, 1984, 30: 2295–2309
- 3 Bowen M, Huber P. Reactor neutrino applications and coherent elastic neutrino nucleus scattering. *Phys Rev D*, 2020, 102: 053008
- 4 Vogel P, Beacom J F. Angular distribution of neutron inverse beta decay, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. *Phys Rev D*, 1999, 60: 053003
- 5 Kopeliovich V B, Frankfurt L L. Isotopic and chiral structure of neutral current. *JETP Lett*, 1974, 19: 145–147
- 6 Cañas B C, Garcés E A, Miranda O G, et al. Future perspectives for a weak mixing angle measurement in coherent elastic neutrino nucleus scattering experiments. *Phys Lett B*, 2018, 784: 159–162
- 7 Dutta B, Mahapatra R, Strigari L E, et al. Sensitivity to Z-prime and nonstandard neutrino interactions from ultralow threshold neutrino-nucleus coherent scattering. *Phys Rev D*, 2016, 93: 013015
- 8 Akimov D, Albert J B, An P, et al. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering. *Science*, 2017, 357: 1123–1126
- 9 Miranda O G, Papoulias D K, Tórtola M, et al. Probing neutrino transition magnetic moments with coherent elastic neutrino-nucleus scattering. *J High Energ Phys*, 2019, 2019: 103
- 10 Kosmas T S, Papoulias D K, Tórtola M, et al. Probing light sterile neutrino signatures at reactor and spallation neutron source neutrino experiments. *Phys Rev D*, 2017, 96: 063013
- 11 Papoulias D K, Kosmas T S. COHERENT constraints to conventional and exotic neutrino physics. *Phys Rev D*, 2018, 97: 033003
- 12 Dutta B, Liao S, Sinha S, et al. Searching for beyond the standard model physics with COHERENT energy and timing data. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 061801
- 13 Liao J, Marfatia D. COHERENT constraints on nonstandard neutrino interactions. *Phys Lett B*, 2017, 775: 54–57

- 14 Farzan Y, Lindner M, Rodejohann W, et al. Probing neutrino coupling to a light scalar with coherent neutrino scattering. *J High Energy Phys*, 2018, 2018: 066
- 15 Denton P B, Farzan Y, Shoemaker I M. Testing large non-standard neutrino interactions with arbitrary mediator mass after COHERENT data. *J High Energy Phys*, 2018, 2018: 037
- 16 Cadeddu M, Giunti C, Kouzakov K A, et al. Neutrino charge radii from COHERENT elastic neutrino-nucleus scattering. *Phys Rev D*, 2018, 98: 113010
- 17 Cañas B C, Garcés E A, Miranda O G, et al. Interplay between nonstandard and nuclear constraints in coherent elastic neutrino-nucleus scattering experiments. *Phys Rev D*, 2020, 101: 035012
- 18 Akimov D, An P, Awe C, et al. Measurement of the coherent elastic neutrino-nucleus scattering cross section on CsI by COHERENT. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 081801
- 19 De Romeri V, Miranda O G, Papoulias D K, et al. Physics implications of a combined analysis of COHERENT CsI and LAr data. *J High Energy Phys*, 2023, 2023: 035
- 20 Miranda O G, Papoulias D K, Sanders O, et al. Low-energy probes of sterile neutrino transition magnetic moments. *J High Energy Phys*, 2021, 2021: 191
- 21 Atzori Corona M, Cadeddu M, Cargioli N, et al. Impact of the Dresden-II and COHERENT neutrino scattering data on neutrino electromagnetic properties and electroweak physics. *J High Energy Phys*, 2022, 2022: 164
- 22 Corona M A, Cadeddu M, Cargioli N, et al. Probing light mediators and $(g - 2)_\mu$ through detection of coherent elastic neutrino nucleus scattering at COHERENT. *J High Energy Phys*, 2022, 2022: 109
- 23 Khan A N. Neutrino millicharge and other electromagnetic interactions with COHERENT-2021 data. *Nucl Phys B*, 2023, 986: 116064
- 24 Akimov D, Albert J B, An P, et al. First measurement of coherent elastic neutrino-nucleus scattering on argon. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 012002
- 25 Boireau G, Bouvet L, Collin A P, et al. Online monitoring of the Osiris reactor with the nucifer neutrino detector. *Phys Rev D*, 2016, 93: 112006
- 26 Bernstein A, Wang Y, Gratta G, et al. Nuclear reactor safeguards and monitoring with antineutrino detectors. *J Appl Phys*, 2002, 91: 4672–4676
- 27 Kim Y. Detection of antineutrinos for reactor monitoring. *Nucl Eng Tech*, 2016, 48: 285–292
- 28 Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. Search for coherent elastic scattering of solar ^8B neutrinos in the XENON1T dark matter experiment. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 091301
- 29 Aprile E, Aalbers J, Abe K, et al. First measurement of solar ^8B neutrinos via coherent elastic neutrino-nucleus scattering with XENONnT. arXiv: 2408.02877
- 30 Ma W, Abdukerim A, Cheng C, et al. Search for solar ^8B neutrinos in the PandaX-4T experiment using neutrino-nucleus coherent scattering. *Phys Rev Lett*, 2023, 130: 021802
- 31 Bo Z, Chen W, Chen X, et al. First indication of solar ^8B neutrino flux through coherent elastic neutrino-nucleus scattering in PandaX-4T. arXiv: 2407.10892
- 32 Freedman D Z, Schramm D N, Tubbs D L. The weak neutral current and its effects in stellar collapse. *Annu Rev Nucl Sci*, 1977, 27: 167–207
- 33 Horowitz C J, Coakley K J, McKinsey D N. Supernova observation via neutrino-nucleus elastic scattering in the CLEAN detector. *Phys Rev D*, 2003, 68: 023005
- 34 Billard J, Figueroa-Feliciano E, Strigari L. Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments. *Phys Rev D*, 2014, 89: 023524
- 35 Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. Physics reach of the XENON1T dark matter experiment. *J Cosmol Astropart Phys*, 2016, 2016: 027
- 36 Scholberg K. Prospects for measuring coherent neutrino-nucleus elastic scattering at a stopped-pion neutrino source. *Phys Rev D*, 2006, 73: 033005
- 37 Akimov D, An P, Awe C, et al. Simulating the neutrino flux from the spallation neutron source for the COHERENT experiment. *Phys Rev D*, 2022, 106: 032003
- 38 Dorenbosch J, Allaby J V, Amaldi U, et al. Experimental verification of the universality of electron-neutrino and muon-neutrino coupling to the neutral weak current. *Phys Lett B*, 1986, 180: 303–307
- 39 Tayloe R. The CENNS-10 liquid argon detector to measure CEvNS at the spallation neutron source. *J Inst*, 2018, 13: C04005
- 40 Akimov D, Albert J B, An P, et al. First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon. *Phys Rev D*, 2019, 100: 115020
- 41 An P, Awe C, Barbeau P S, et al. Measurement of electron-neutrino charged-current cross sections on I127 with the COHERENT NaIvE detector.

- [Phys Rev Lett](#), 2023, 131: 221801
- 42 Aguilar-Arevalo A A, Alves D S M, Biedron S, et al. First dark matter search results from coherent CAPTAIN-Mills. [Phys Rev D](#), 2022, 106: 012001
 - 43 Simón A. CEvNS at the European spallation source. In: Proceedings of the XVIII International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics. Trieste: Proceedings of Science, 2024. 171
 - 44 Mueller T A, Lhuillier D, Fallot M, et al. Improved predictions of reactor antineutrino spectra. [Phys Rev C](#), 2011, 83: 054615
 - 45 Bonet H, Bonhomme A, Buck C, et al. Constraints on elastic neutrino nucleus scattering in the fully coherent regime from the CONUS experiment. [Phys Rev Lett](#), 2021, 126: 041804
 - 46 Bonet H, Bonhomme A, Buck C, et al. Novel constraints on neutrino physics beyond the standard model from the CONUS experiment. [J High Energ Phys](#), 2022, 2022: 85
 - 47 Bonet H, Bonhomme A, Buck C, et al. First upper limits on neutrino electromagnetic properties from the CONUS experiment. [Eur Phys J C](#), 2022, 82: 813
 - 48 Ackermann N, Bonet H, Bonhomme A, et al. Final CONUS results on coherent elastic neutrino nucleus scattering at the Brokdorf reactor. arXiv: [2309.01843](#)
 - 49 Alekseev I, Balej K, Belov V, et al. First results of the vGeN experiment on coherent elastic neutrino-nucleus scattering. [Phys Rev D](#), 2022, 106: L051101
 - 50 Colaresi J, Collar J I, Hossbach T W, et al. Measurement of coherent elastic neutrino-nucleus scattering from reactor antineutrinos. [Phys Rev Lett](#), 2022, 129: 211802
 - 51 Colaresi J, Collar J I, Hossbach T W, et al. First results from a search for coherent elastic neutrino-nucleus scattering at a reactor site. [Phys Rev D](#), 2021, 104: 072003
 - 52 Soma A K, Singh M K, Singh L, et al. Characterization and performance of germanium detectors with sub-keV sensitivities for neutrino and dark matter experiments. [Nucl Instrum Methods A](#), 2016, 836: 67–82
 - 53 Liao J, Liu H, Marfatia D. Implications of the first evidence for coherent elastic scattering of reactor neutrinos. [Phys Rev D](#), 2022, 106: L031702
 - 54 Augier C, Baulieu G, Belov V, et al. First demonstration of 30 eVee ionization energy resolution with Ricochet germanium cryogenic bolometers. [Eur Phys J C](#), 2024, 84: 186
 - 55 Augier C, Baulieu G, Belov V, et al. Results from a prototype TES detector for the Ricochet experiment. [Nucl Instrum Methods A](#), 2023, 1057: 168765
 - 56 Augier C, Baulieu G, Belov V, et al. Fast neutron background characterization of the future Ricochet experiment at the ILL research nuclear reactor. [Eur Phys J C](#), 2023, 83: 20
 - 57 Cruciani A, Bandiera L, Calvo M, et al. BULLKID: Monolithic array of particle absorbers sensed by kinetic inductance detectors. [Appl Phys Lett](#), 2022, 121: 213504
 - 58 Iyer V. Large-mass single-electron resolution detector for dark matter and coherent neutrino-nucleus elastic interaction searches. In: Proceedings of the 24th DAE-BRNS High Energy Physics Symposium. Berlin: Springer, 2022. 893–897
 - 59 Ang W E, Prasad S, Mahapatra R. Coherent elastic neutrino nucleus scatter response of semiconductor detectors to nuclear reactor antineutrinos. [Nucl Instrum Methods A](#), 2021, 1004: 165342
 - 60 Aguilar-Arevalo A, Bertou X, Bonifazi C, et al. Exploring low-energy neutrino physics with the coherent neutrino nucleus interaction experiment. [Phys Rev D](#), 2019, 100: 092005
 - 61 Aguilar-Arevalo A, Bernal J, Bertou X, et al. Search for coherent elastic neutrino-nucleus scattering at a nuclear reactor with CONNIE 2019 data. [J High Energ Phys](#), 2022, 2022: 17
 - 62 Fernandez-Moroni G, Machado P A N, Martinez-Soler I, et al. The physics potential of a reactor neutrino experiment with Skipper CCDs: Measuring the weak mixing angle. [J High Energ Phys](#), 2021, 3: 186
 - 63 Fernandez-Moroni G, Harnik R, Machado P A N, et al. The physics potential of a reactor neutrino experiment with Skipper-CCDs: Searching for new physics with light mediators. [J High Energ Phys](#), 2022, 2: 127
 - 64 Choi J J, Jeon E J, Kim J Y, et al. Exploring coherent elastic neutrino-nucleus scattering using reactor electron antineutrinos in the NEON experiment. [Eur Phys J C](#), 2023, 83: 226
 - 65 Kluck H, Anglhofer G, Bento A, et al. Nucleus: Searching for coherent neutrino nucleus scattering at lowest energies. [J Low Temp Phys](#), 2022,

209: 936–943

- 66 Akimov D Y, Belov V A, Bolozdynya A I, et al. First ground-level laboratory test of the two-phase XENON emission detector RED-100. *J Inst*, 2020, 15: P02020
- 67 Flores L J, Peinado E, Alfonso-Pita E, et al. Physics reach of a low threshold scintillating argon bubble chamber in coherent elastic neutrino-nucleus scattering reactor experiments. *Phys Rev D*, 2021, 103: L091301
- 68 Balogh L, Beaufort C, Brossard A, et al. The NEWS-G detector at SNOLAB. *J Inst*, 2023, 18: T02005
- 69 Yang L T, Liang Y F, Yue Q. RECODE program for reactor neutrino CEvNS detection with PPC Germanium detector. In: Proceedings of the XVIII International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics. Trieste: Proceedings of Science, 2024. 296
- 70 Yang L T. Dark Matter Direct Detection Research with CDEX-1B Point-Contact High Purity Germanium Detector (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2017 [杨丽桃. 基于CDEX-1B点电极高纯锗探测器的暗物质直接探测. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2017]
- 71 Yang L T, Li H B, Yue Q, et al. Search for light weakly-interacting-massive-particle dark matter by annual modulation analysis with a point-contact germanium detector at the China Jinping Underground Laboratory. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 221301
- 72 Yang L T, Li H B, Yue Q, et al. Limits on light WIMPs with a 1 kg-scale germanium detector at 160 eVee physics threshold at the China Jinping Underground Laboratory. *Chin Phys C*, 2018, 42: 023002
- 73 Zhang Z, Yang L, Yue Q, et al. Probing dark matter particles from evaporating primordial black holes via electron scattering in the CDEX-10 experiment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2024, 67: 101011
- 74 Huber P. Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors. *Phys Rev C*, 2011, 84: 024617
- 75 An F P, Balantekin A B, Band H R, et al. Improved measurement of the reactor antineutrino flux and spectrum at Daya Bay. *Chin Phys C*, 2017, 41: 013002
- 76 Yang L T, Xu R, Yue Q. Recent status and prospects of CDEX dark matter search at CJPL In: Proceedings of the XVIII International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics. Trieste: Proceedings of Science, 2024. 051
- 77 Geng X P, Yang L T, Yue Q, et al. Projected WIMP sensitivity of the CDEX-50 dark matter experiment. *J Cosmol Astropart Phys*, 2024, 2024: 009
- 78 Abdurkerim A, Bo Z H, Chen W, et al. PandaX-xT: A multi-ten-tonne liquid XENON observatory at the China Jinping Underground Laboratory. arXiv: [2402.03596](https://arxiv.org/abs/2402.03596)
- 79 Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. Projected WIMP sensitivity of the XENONnT dark matter experiment. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, 2020(11): 031
- 80 Aprile E, Abe K, Agostini F, et al. First dark matter search with nuclear recoils from the XENONnT experiment. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 041003

International survey of coherent elastic neutrino-nucleus scattering experiments and the CDEX-RECODE experiment

LIANG YiFan, YANG LiTao^{*} & YUE Qian^{*}

Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Corresponding authors (YANG LiTao, email: yanglt@mail.tsinghua.edu.cn; YUE Qian, email: yueq@mail.tsinghua.edu.cn)*

Coherent elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS) is a fundamental neutrino-matter interaction predicted by the Standard Model, in which neutrinos elastically scatter off entire atomic nuclei. Detection of CEvNS not only enables researchers to verify the Standard Model but also provides opportunities to explore physics beyond it. Furthermore, CEvNS measurements could potentially offer new approaches for real-time reactor monitoring and detection of solar and supernova neutrinos. CEvNS will also emerge as a significant background source for next-generation dark matter direct detection experiments. Given its importance, CEvNS detection has become a frontier topic in neutrino physics, with numerous detection experiments currently operating or under development worldwide. However, the extremely low cross section of CEvNS poses significant challenges for detector threshold and background requirements. The CDEX-RECODE experiment, a reactor neutrino CEvNS detection experiment utilizing high purity germanium detectors, is scheduled to operate at the Sanmen Nuclear Power Plant in Zhejiang, China. With its projected energy threshold of approximately 160 eVee (1 keVnr), the low-energy background of less than 2 cpkcd, and exceptional long-term stability, CDEX-RECODE holds significant advantages among similar experiments. This review surveys the current landscape of CEvNS detection experiments worldwide and discusses the future prospects of the CDEX-RECODE experiment in China.

coherent elastic neutrino-nucleus scattering, reactor neutrinos, CDEX-RECODE experiment, high purity germanium detector

PACS: 95.55.Vj, 29.40.WK, 25.30.Pt

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0419](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0419)