

CIAE 核探测器技术的发展

何高魁, 刘洋, 张向阳, 赵江滨, 郝晓勇, 邵俊琪, 汤秀章, 宛玉晴, 杨昉东, 阙子昂

(中国原子能科学研究院 核技术应用研究所, 北京 102413)

摘要:核探测器技术是我国核科学技术发展的核心支撑学科。中国原子能科学研究院(CIAE)先后为我国核科学技术的发展提供了各类型探测器 67 种以上, 提供核电子仪器和装置多达七、八十种, 计几千台件, 为我国核科学发展做出了重要贡献。“十一五”以来, CIAE 开展了硅平面工艺半导体探测器、化合物半导体探测器、高纯锗探测器、核四极共振探测器、高温裂变电离室探测器等研究, 突破了多项关键技术, 研发了多种先进核探测器/装置, 为我国核技术应用、国家安全及国民经济的发展作出重要贡献。

关键词:核探测器; 核电子学; 地雷探测; 核技术应用

中图分类号: TL364.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)S0-0303-06

doi: 10.7538/yzk.2020.zhuankan.0434

Development of Nuclear Detector Technology in CIAE

HE Gaokui, LIU Yang, ZHANG Xiangyang, ZHAO Jiangbin, HAO Xiaoyong,
SHAO Junqi, TANG Xiuzhang, WAN Yuqing, YANG Fangdong, QUE Ziang

(*Department of Nuclear Technology Application,*

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Nuclear detection technology is the core supporting discipline for the research and development of nuclear science and technology. China Institute of Atomic Energy (CIAE) has successively provided more than 67 kinds of detectors, and more than seventy kinds of nuclear electronics instruments and devices (more than several thousand sets in total) for the research and development of nuclear science and technology in China, which makes an important contribution to the development of nuclear science in China. With the supports of the state, CIAE has carried out research on planar technology silicon detectors, compound semiconductor detectors, high-purity germanium detector, nuclear quadrupole resonance detector and high-temperature fission ionization chamber detector etc. since the 11th five-year-plan. Breaking through a series of key technologies, CIAE has developed a variety of advanced nuclear detectors or devices used in the fields of nuclear technology application, national security and national economy, and made new contributions to the country.

Key words: nuclear detector; nuclear electronics; mine detection; nuclear technology application

核探测器技术是我国核科学技术发展的核心支撑学科。核安全、核设施放射性监测、核燃料矿勘测、各种辐射场的个人剂量计、空间探测、核查和核保障、反恐与安检等领域都迫切需要具有高能量分辨率、快时间响应、宽动态范围以及具有时间和位置分辨的先进核探测器技术。国外对有些探测器进行技术封锁,无法完全依靠进口解决。发展我国的先进核探测器技术,满足核能发展和核技术应用对先进核探测器技术的需求,对实现关键设备的国家自主可控具有重要意义。

在两弹一艇攻关时期,中国原子能科学研究院(CIAE)是我国唯一的核探测器技术研发基地,得到了国家的高度重视。多年来,CIAE先后为我国核科学技术的发展提供了各种类型的气体探测器、闪烁探测器、固体径迹探测器及半导体探测器 67 种以上,提供核电子仪器和装置多达七、八十种,计几千台件,为我国核科学发展做出了重要贡献。20 世纪 80 年代开始,CIAE 先后开发出 20 多种放射性同位素仪表及专用设备,为我国国民经济的发展和事业作出重要贡献。“十五”以来,CIAE 的核探测器技术进入了快速发展阶段,研发了多种先进核探测器和仪器设备,为核能开发、反恐与安检等领域提供强有力支撑。本文就 CIAE 核探测器技术的发展进行综述。

1 CIAE 核探测器技术的发展

1.1 起步发展阶段

建所初期,国内没有现成的仪器设备及相应的工业基础,西方国家又对我国实行封锁和禁运,在这种艰难条件下,要建立和发展各种核物理和放射化学的实验技术,就不得不从研制各种探测器、电子仪器和粒子加速器开始,甚至从研究真空技术和材料纯化等基础工作开始。

在第一个五年计划期间,由戴传曾先生等研制成氘铍中子源和中子计数管,为开展中子物理方面的研究工作提供了初步条件;在何泽慧先生领导下,研制成功了质子灵敏乳胶和电子灵敏乳胶。在戴传曾、李德平和杨澄中先生领导下,分别研制成卤素计数管、盖革计数管、碘化钠(铯)闪烁晶体等。其中核乳胶和卤素计数管达到了国际同类型号的先进水平,获得科

学院 1956 年自然科学三等奖,这是我院自国家颁布科学奖励以来的首批获奖成果^[1-3]。

在谱仪和核电子学方面,由梅镇岳、郑环生先生领导,建造了单透镜 β 谱仪,并设计了有铁双聚焦谱仪、无铁双聚焦谱仪、中间成像谱仪、永磁式 $180^\circ \beta$ 谱仪、 β - γ 符合谱仪。在张建中先生领导下,建造了 $180^\circ \alpha$ 谱仪。在杨澄中、忻贤杰先生领导下,研制成一批真空管型的核电子学仪器,如线性脉冲放大器、高压稳定电源、64 进位定标器、计数率仪、单道脉冲分析器等^[1]。

1957—1958 年间,研制成功 100 道脉冲幅度分析器、毫微秒示波器、毫微秒脉冲产生器、光电倍增管、有机闪烁晶体、碘化钠(铯)晶体等,并进行了小批量的生产^[1]。

20 世纪 50 年代末正式组建了核电子学和核探测器研究室(当时称为十三室),第一任主任是刘书林(后为核工业部副部长),副主任是黄为伟、李德平先生。

1.2 为两弹一艇攻关服务

核探测器和核电子学仪器的研发人员克服自然灾害带来的严重困难,独立自主、奋发图强,投入“两弹”攻关的战斗,承担了多项专用核探测器系统和其他探测仪器的研制任务。1964 年承担了研制 λ 值测量的重要设备,这套设备包括电子倍增器和 SB-12 单次快脉冲照相示波器两部分,曾先后荣立国防科委授予的三等功^[1-2]。

1964—1975 年间,CIAE 用自己生产的碘化钠(铯)晶体和盖革计数管开发成功高空 γ 辐射强度自动记录系统,进行放射性烟云在空间高度和宽度上的分布测量。

在燃耗测量攻关任务中,十三室完成了电离室的研制和测量任务。研制成碘化铯(铯)晶体、大体积苾闪烁晶体等,为各相关单位提供了气体探测器、闪烁探测器为主的许多探测器和电子仪器。

1.3 全面发展阶段

20 世纪 70—80 年代,研制成多种新型核探测器,包括硅面垒探测器、锗(锂)(Ge(Li))平面型探测器、锗(锂)同轴型探测器、硅 PIN 电流型探测器、硅(锂)(Si(Li))X 射线探测器、BF₃ 中子正比计数管、多丝正比探测器及碲化

镉(CdTe)单晶和探测器等。

在核电子学方面开展了 NIM 标准核电子仪器插件研制工作,研制成功时-幅变换器、上升时间幅度变换器、恒比定时电路等快线路电子仪器插件。

在核探测器技术应用方面,与大庆油田合作开展了锗(锂) γ 能谱测油井的方法和测油井装置研究工作,并取得重大成果。如“Ge(Li)探测器-脉冲中子源 γ 能谱测井”1979年获国防科委重大科研成果三等奖,1989年获国家发明三等奖。1978年,CIAE 半导体探测器获全国科学大会奖。

1970年5月,我国第1艘核潜艇堆启动前,CIAE 承担的启动、运行所需要的强中子源及有关测试仪表、核探测器等均提前制成运往现场,为第1艘核潜艇下水做出了积极贡献。在人造卫星等方面,CIAE 完成了小型紫外光电管、塑料闪烁体、ZnS(Ag)中子屏探测器、高纯氦-3等任务^[1]。

1972年以后,开展了固体径迹探测器应用在测定地质年代、周口店猿人年代、马王堆汉墓年代等方面的研究,并得到较好的效果。研制成功 HW3、HW4 细颗粒电子核乳胶,其主要性能达到国际水平,为开展双标记放射显影工作创造了条件。CIAE 为医学、生物研究等 30 余个单位提供了核乳胶。

1976年研制成功了离子注入硅 PIN 电流型探测器,接近当时的国际水平。在 20 世纪 80 年代,研制成功了高纯锗平面型 X 射线探测器、多种硅平面工艺探测器、 ^3He 正比管、硅(锂)X 射线探测器谱仪系统和同轴型高纯锗(HPGe) γ 谱仪系统,后两种系统在性能指标上达到国际水平。在核电子学方面,研制成功微型计算机多道系统,完善了 NIM 插件系统。

改革开放以后,利用核技术应用的产业优势面向市场进行了系列的技术研究和产品开发。研发了 20 多种放射同位素仪器和专用设备,如研制成功了镭-241 烟雾火灾报警器,组建了烟雾报警器厂。在 20 世纪 80 年代中期,组建了核测井研究室,研制成功油田用高纯锗自然 γ 能谱测井仪、碳氧比测井仪、中子寿命测井仪、煤田用瞬发 γ 测井装置等,取得重要研究成果并建立了用缓发中子计数法测铀矿的装置

和方法,于 1988 年获得了国家科学进步三等奖。同时还研制了黄金成色分析仪、料位计、液位计、流量计、核子秤、骨密度仪、人发分析仪等民用产品,其中黄金成色分析仪的各项技术指标得到了中国人民银行管理司的确认,经过国内多家单位使用后,于 1993 年通过了部级鉴定,1995 年获中国高新技术产品博览会金奖。该仪器先后生产 400 多台,出售到国内各地以及新加坡、印度尼西亚和香港等国家和地区,获得了良好的社会和经济效益。

1.4 新的发展时期

20 世纪 80 年代中下期直到 90 年代末,由于基本上没有科研经费支持,没有力量研发新技术、新工艺和新材料,学科发展受到影响,与世界水平的差距逐渐拉大。而国外核探测器技术的发展突飞猛进,有许多新型探测器器件问世。

“十五”以来,在国家的支持下,CIAE 核探测器技术进入了发展新阶段,研发了多项新型核探测器技术。

1) 新型室温探测器研制

便携式硅(锂)X 射线探测器,有效面积 80 mm^2 ,能量分辨 $<400\text{ eV}$ (对 5.9 keV);硅平面工艺 PIN 探测器, 5 mm^2 探测器能量分辨 $<200\text{ eV}$ (对 5.9 keV ,微型电致冷);面积 25 mm^2 电流型探测器过耗尽漏电流小于 $0.01\text{ }\mu\text{A}$,饱和漂移电压时漏电流小于 $0.1\text{ }\mu\text{A}$,上升时间小于 3 ns 。还有碲锌镉化合物半导体探测器、屏栅电离室等。其中的硅平面工艺等探测器在国内处于领先地位。

实验室在国内最早开展了硅平面工艺探测器研发,研发的硅 PIN 电流型和能谱型探测器、线性阵列核探测器、大面积电流型探测器、大面积多条探测器、SiPIN- ^3He -SiPIN 中子能谱探测器等提供用户使用,并应用于重大试验中 X、 γ 和中子脉冲束测量,满足了核测量的要求。在国内率先开展了 CZT、TiBr、SiC 等化合物半导体探测器研发,研发的探测器提供空间研究所用于星载传感器,研发的 CZT 探测器用于嫦娥二号卫星星载探测器。

2) 高能 X 射线成像技术和固体线性阵列探测器研究

采用平面工艺技术,自主创新探测器结构

设计和制造工艺,最早研制成功了不同像素尺寸的硅光二极管线性阵列与闪烁体线性阵列组合而成的高能 X 射线固体线性阵列探测器,填补了我国在这一领域的空白。

3) 爆炸物核探测器应用技术研究

在国内首次利用核四极共振(NQR)技术研制了实用化爆炸物检测系统。NQR 技术是基于原子核的四极矩与原子核外的电场梯度相互作用产生的能级分裂。由于该能级依赖于构成物质的分子结构、化学键和原子价态,即使是同一原子核,物质不同,其特征的 NQR 频率不同,即 NQR 频率具有指纹特征,可用于物质检测,在爆炸物探测、塑性地雷探测领域具有独特的优势。CIAE 突破了 NQR 信号脉冲激励、极微弱信号检测处理、动态调谐匹配、时域信号加权变换等关键技术。由于 NQR 信号非常微弱,采取了自动精确调谐技术、放大器优化设计和数据变换算法实现了 NQR 谱线提取,显著提高了探测灵敏度。2003 年研制了 54 升通道式实验样机。2005 年与澳大利亚合作研制成功 CIAE-QRS 爆炸物检测装置,并通过了北京市公安局组织的评审验收。2008 年自主研发成功 EDS-M 邮件爆炸物检测系统、EDS-B 手提包爆炸物检测系统。该装置填补了我国 NQR 技术在爆炸物检测技术和反恐装备方面的空白,使我国成为少数几个具备生产此类装置能力的国家。研发的 NQR 爆炸物探测技术达到国际先进、国内领先水平,成功应用于北京奥运安保,为奥运安保做出了贡献,获得国防科工局颁发的卓越贡献奖。

“十三五”以来,CIAE 承担了多项国家科研任务,研发了多种先进核探测器/装置。

1) 高温裂变电离室技术

快堆是第 4 代先进核能技术,由于采用钠冷池式结构,堆外核测系统距堆芯较远,在快堆启动和换料期间,为防止因堆外核测量系统处于测量盲区而造成中子注量率监测失效,必须在堆内安装中子注量率监测用高温裂变电离室。高温裂变电离室由探头和二次仪表组成,用于快堆装料、启动及运行等工况进行中子注量监测,具有宽量程、高温环境工作等特点。由于高温裂变电离室探头安装在堆内,需在高温、强辐射等恶劣环境下工作,技术难度大,国际上

只有美国、俄罗斯和法国掌握该技术。CIAE 经过刻苦攻关,突破了耐高温铀涂镀、高温金属-陶瓷密封绝缘、信号长线传输抗干扰等关键技术,研发出高温裂变电离室样机。灵敏度达到 1.3 cps/nV,优于俄罗斯进口同类产品,该项技术的研究填补了国内空白。

2) 核燃料组件无损检测技术

核燃料组件是反应堆的核心部件,燃料芯块运行期间会在固态及气态裂变产物、热应力、中子辐照等因素的综合作用下发生肿胀、开裂,严重情况下甚至会出现破碎。CIAE 于 2013 年开始核燃料组件探测技术研究,经过几年的不断改进和完善,利用双高能加速器产生的 X 射线的能量差异消减组件本身的强辐射干扰对成像探测的影响,结合动态标定技术实时修正探测器通道的不一致性,成功研制了核燃料组件探测装置,通过对整体组件断层成像可高效地获取燃料组件内芯块裂纹、气孔等缺陷信息,还可获取各元件内部的芯块形态及芯块与包壳的相互作用情况,对于评价燃料元件性能、探索燃料包壳的破损机理均有着重要意义。该项技术的研究填补了国内空白,目前强辐射本底下空间分辨率可达到 2.0 LP/mm。

3) 超薄快响应探测器技术

针对模拟核爆脉冲束超快响应探测技术瓶颈,开展了超快响应 X 射线探测器技术研究,突破了快响应探测器工艺制备的关键技术(超薄灵敏层制备工艺技术),有效面积 120 mm²的探测器灵敏层厚度小于 50 μm。掌握低功耗微型化核电子学技术,实现了皮秒级探测器响应速度,为模拟核爆 X 射线脉冲束测量提供了有效手段。

4) 高纯锗探测器能谱仪

高纯锗探测器是性能优良的半导体探测器,具有能量分辨率高、探测效率高等特点。对 X、γ 射线能量分辨率达千分之几,比 NaI、CZT、HgI₂、GaAs 等常用的晶体探测器的能量分辨率高 1 个量级,因此高纯锗探测器不仅成为核能开发、核技术应用、核安保、核物理、粒子物理、天体物理实验研究的首选,且成为材料科学、环境监测、检验检疫、生物医学、地质、考古学、冶金、微量元素分析等方面不可或缺的仪器设备。同时高纯锗探测器作为高准确度测量活

度的仪器是 γ 核素活度量值传递中的标准器具。我国每年需向国外 ORTEC、Canberra 等公司进口大量高纯锗探测器, 价值数亿元。由于国际形势变化, 美国及西方国家对我国进行关键技术的封锁, 高纯锗探测器存在禁运风险。CIAE 在前期研究基础上进行了高纯锗探测器探头优化设计、高纯锗探测器工艺改进、制冷封装结构优化等, 突破了高纯锗晶体高稳定性表面态工艺、低噪声高计数率脉冲复位前置放大器等关键技术, P 型同轴结构高纯锗探测器能量分辨率与国际水平一致, 对于 133 MeV γ 射线, 40% 探测效率探测器的能量分辨率好于 198 keV^[4], 且新研发的电制冷高纯锗能谱仪可在没有液氮的地方使用, 具有很强的环境适应性。

5) 大面积硅探测器

大面积硅探测器是基于硅平面工艺技术的 PIPS 探测器, 采用晶向 N(111) 高阻硅片制备, 可用于 X、 γ 脉冲束、气溶胶放射性测量。CIAE 突破了低漏电流、大动态范围电流探测器工艺制备关键技术, 研发了灵敏直径 $\phi 20 \sim 60$ mm 多种规格的电流型探测器。

6) 先进半导体中子探测器技术

中子探测器技术广泛应用于科研等领域和设施上, 如隐藏核材料探测、反应堆探测、中子散射实验、特殊核材料管理、外太空探测等。目前主要的中子探测器有气体探测器、闪烁体探测器、半导体探测器、热释光探测器、径迹探测器和自给能探测器。

在核反应堆堆芯、高能物理实验等高温高压、强辐射的极端环境中进行辐射监测时, 探测器的耐高温和耐辐照性能备受关注。基于硼半导体的固体中子探测器结构紧凑、探测效率高, 具有极大的优势。氮化硼晶体是一种宽禁带半导体材料, 禁带宽度为 6.1~6.4 eV, 属于间接带隙, 通过掺杂可得到 P 型和 N 型的半导体材料。氮化硼宽禁带半导体探测器本身对中子灵敏, 不需使用硅半导体探测器中的中子灵敏转换层, 可直接测量中子计数和中子能谱^[5], 可快速准确地反应中子剂量变化, 70 μm 厚¹⁰ BN 探测器对热中子的探测效率理论上可达 78%^[6], 在中子探测方面有良好的应用前景。CIAE 开展氮化硼材料均匀性控

制技术研究, 大面积氮化硼材料生长技术研究, 开展氮化硼材料的缺陷控制技术研究; 开展氮化硼中子探测器结构设计研究, 开展氮化硼探测器制备工艺研究, 研制低漏电、大尺寸、高性能氮化硼探测器; 开展氮化硼探测器的含噪声优化的电学模型研究, 突破低噪声设计技术, 并基于此电学模型, 设计并研制专用的 ASIC 芯片。完成氮化硼探测器谱仪系统性能指标测试。

7) 反中微子探测器技术

反中微子探测技术可用于反应堆运行的安全监测和防核扩散^[7-9]。反应堆运行时, 每个核裂变释放出 6 个反中微子^[10-11], 60 MW 反应堆每秒释放出 1×10^{19} 个反中微子^[12-13]。反中微子能量很高, 能穿过任何物质。反应堆发出的每个反中微子与探测器中的质子反应产生 1 个正电子和 1 个中子, 通过符合探测正电子与中子技术即可探测反中微子事件。反中微子探测技术抗干扰性强, 不具有入侵性, 不要求与反应堆连接, 可实现对反应堆运行状况的远程监测, 还可用于任何人为裂变进程的监测。CIAE 突破反中微子粒子鉴别和宇宙射线剔除关键技术, 建立了反中微子探测器装置, 实现对反应堆核材料裂变产生的反中微子事件的探测。

8) 先进缪子探测器技术

宇宙射线缪子是一种高能射线、具有极强的穿透能力, 特别适合于探测大型致密物体的内部信息。近年来缪子探测技术逐渐成为核材料检查、核反恐的利器, 其应用领域包括核材料检查、堆芯监测、放射性废物检测等领域。研究新型的光导缪子探测器技术, 开展缪子望远镜的研制将为我国开展远距离发现、探测核目标的应用验证提供技术支撑和必要的实验平台, 具有重要的应用价值。CIAE 建立了 1 套国内最大型的缪子散射成像实验室原理装置, 获得了较为清晰的检测图像, 在此基础上开展缪子透视成像技术, 掌握先进的位置分辨光导缪子探测器、甚多路光耦合 SiPM 扇出电子学及高效快速图像重建技术, 研制出大口径高分辨率缪子望远镜实验室原理装置, 为远距离探测核目标奠定必要的实验平台和先进的技术基础。

2 核探测器技术研发能力提升

CIAE进行了核探测器研发能力建设,建立了400 m²千级和50 m²百级洁净工艺间,极大提升我国先进探测器研发能力,具备研制出国际水平的结构复杂、高性能的核探测器与核电子学系统条件,满足核技术应用等领域对各种核探测器系统的需求。同时可培养高水平的人才队伍,支撑我国的核探测器与核电子学技术可持续发展。

3 核探测器技术发展方向

当前,我国高技术领域对先进核探测器的需求越来越迫切,如模拟核爆实验中X和 γ 射线脉冲束的测量、中子能谱及注量测量、核燃料矿勘测、个人剂量计、远程反潜、核反恐、核应急、核查和核保障、空间探测等领域均需高性能的核探测器及其相关电子学。

核武器的装配质量确认、长期储存后评价、分解过程检查以及火箭发动机等的无损检测和反恐等领域均需高能X射线二维、三维辐射成像技术,其重要核心技术是各种一维、二维高能X射线固体阵列探测器。

爆炸物、毒品等违禁品探测技术是我国目前急需的技术和长期的任务,也是世界性的课题,NQR方法已发展成为隐藏爆炸物(包括地雷)的指纹鉴别方法。中子分析技术则对于检查隐藏在金属屏蔽体中的爆炸物具有极大的优势。

为适应新时期的任务,CIAE核探测器技术的主要研究方向为:硅平面工艺探测器、化合物半导体探测器、新型半导体中子探测器、缪子探测器、反中微子探测器、气体探测器及其他特殊探测器、探测器信号读出芯片、X射线成像探测器,发展成像电子学及其数字成像技术、爆炸物等违禁品检测技术等。

CIAE有50多年核探测器技术研究的深厚积累,同时具有配套齐全的多学科独特优势,有能力为我国核科技事业及国民经济的发展作出新贡献,并逐步建成具有世界水平的核探测器技术研发基地。

参考文献:

[1] 中国原子能科学研究院简史(1950—2010)[M].

北京:原子能出版社,2010.

- [2] 中国原子能科学研究院大事记汇编(1950—2005)[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2007.
- [3] 谢光. 当代中国和国防科技事业[M]. 北京:当代中国出版社,1992.
- [4] 何高魁. 先进核探测技术研究进展[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2015.
- [5] LI J, DAHAL R, MAJETTY S, et al. Hexagonal boron nitride epitaxial layers as neutron detector materials[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, 654: 417-420.
- [6] MAITY A, GRENADIER S J, LI J, et al. High-efficiency and high-sensitivity thermal neutron detectors based on hexagonal BN epilayers [C]// Proceedings of SPIE. [S. l.]: [s. n.], 2017.
- [7] CLASSEN T, BERNSTEIN A, BOWDEN N S, et al. Development of an advanced antineutrino detector for reactor monitoring[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2015, 771: 139-146.
- [8] SAFDI B R, SUERFU B. Directional antineutrino detection[J]. Physical Review Letters, 2015, 114: 071802.
- [9] 伍浩松,戴定. 美英合作示范反应堆的远程监测[J]. 国外核新闻,2018(5):11.
- [10] 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.
- [11] SWEANY M, BRENNAN J, CABRERA-PALMER B, et al. Above-ground antineutrino detection for nuclear reactor monitoring[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2015, 769: 37-43.
- [12] 王贻芳. 大亚湾反应堆中微子实验[J]. 物理, 2007,36(3):207-214.
WANG Yifang. A neutrino experiment using the Daya Bay reactor[J]. Physics, 2007, 36(3): 207-214(in Chinese).
- [13] 曹俊. 大亚湾与江门中微子实验[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2014,44(10):1 025-1 040.
CAO Jun. Daya Bay and Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) neutrino experiments[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2014, 44(10): 1 025-1 040(in Chinese).