

中国散裂中子源大气中子辐照谱仪的大气中子能谱及单粒子效应评估

胡志良¹⁾²⁾³⁾† 莫莉华¹⁾²⁾³⁾ 周斌¹⁾²⁾³⁾ 易天成¹⁾²⁾³⁾

李梦朝¹⁾²⁾ 赵齐¹⁾²⁾ 梁天骄¹⁾²⁾³⁾‡

1) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

3) (粤港澳中子散射科学技术联合实验室, 东莞 523800)

(2025 年 7 月 22 日收到; 2025 年 8 月 11 日收到修改稿)

中国散裂中子源大气中子辐照谱仪中子能量覆盖 meV—GeV, 1 MeV 以上能区的中子能谱及注量评估对开展大气中子单粒子效应极为重要. 依托 LANSCE WNR 的 ICE 束线中子能谱实测数据, 探索了适用于中高能中子能谱、注量计算的物理模型、计数方式、截面文件等, 生成并验证了用于中子能谱和注量评估的具有能量分布、角度分布和空间分布的二次源项. 基于此获得的中子能谱和注量, 结合国际上现有同类装置及 JESD89A 参考中子能谱, 从谱型、勒索和辐射效应等维度评估, 认为中国散裂中子源大气中子辐照谱仪可能是同类装置最接近自然条件大气中子能谱的装置; 同时结合 Xilinx II 代 FPGA 大气中子实验, 证实中国散裂中子源大气中子辐照谱仪测试结果与国际同类装置上的测试结果具有很好的一致性. 为此, 基于中国散裂中子源大气中子辐照谱仪开展的大气中子单粒子效应研究与工程加速试验结果可直接应用于航空、航天、军事、民用等高可靠性领域, 助力新质生产力的发展.

关键词: 大气中子辐照谱仪, 中子能谱, 中子注量, 单粒子效应

PACS: 29.30.Kv, 61.80.Hg, 02.70.Uu

DOI: 10.7498/aps.74.20250975

CSTR: 32037.14.aps.74.20250975

1 引言

大气中子是由宇宙射线与大气层原子核相互作用产生的高能中子, 对电子元器件和航空设备具有显著危害^[1-4]. 例如大气中子可诱发半导体器件的单粒子效应 (SEE), 导致航空电子设备的软错误或永久性损伤, 威胁飞行安全^[5]. 且随着半导体技术的进步, 大气中子单粒子效应已从偶发事件逐渐演变为严重的潜在安全威胁, 而基于加速器的地面模拟试验是研究大气中子辐照效应最基本、最有效

的途径.

为填补国内大气中子地面加速模拟测试平台空白, 在广东省科学技术厅的资助下, 中国散裂中子源 (CSNS) 大气中子辐照谱仪 (ANIS) 于 2022 年 6 月建成, 与美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 WNR ICE^[6] 和英国散裂中子源 ChipIR^[7] 等, 成为国内外重要的大气中子研究平台. 大气中子辐照谱仪可为新型半导体器件、大规模集成电路、高可靠电子设备等提供大气中子试验环境, 为航空、航天、通讯、能源、电力电子、医疗电子及高性能计算等领域的高可靠电子信息系统研发与产品制造, 提供一个先

† 通信作者. E-mail: huzl@ihep.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: tjliang@ihep.ac.cn

进的、功能强大的大气中子测试与科研平台。

依托中国散裂中子源大气中子辐照谱仪中子能量覆盖 meV—GeV^[8], 而当前半导体工艺条件下, 一般认为诱发中子单粒子效应的中子能量约大于 1 MeV^[9], 为此 1 MeV 以上能区中子能谱及注量评估对开展大气中子单粒子效应测试极为重要. 基于中国散裂中子源当前质子束团时间结构和大气中子辐照谱仪工程实际, 通过绝对测量获得 1 MeV 以上能区中子能谱和注量基本不可行, 因而必须依靠理论模拟与部分实验相结合的方式给出参考值. 本文从大气中子能谱理论模拟、国际同类装置能谱评估以及典型器件单粒子效应实验比对等角度综合评估大气中子辐照谱仪的基本性能.

2 大气中子能谱理论模拟

中国散裂中子源加速器运行频率为 25 Hz, 每个脉冲间隔 400 ms, 正常运行模式为双束团供束, 即每个脉冲中含有两个束团, 束团间隔 410 ns. 特殊情况下可进行短暂地单束团供束. 单个质子束团在时间上呈高斯分布, 半高宽约 52 ns, 全宽约 140 ns. 大气中子辐照谱仪可放置样品的点位到靶心距离介于 20—25 m. 基于上述客观条件, 在单束团供束模式下, 采用飞行时间法开展中子能谱测量, 可测量的中子能量上限约为 2.5 MeV, 其对应能量分辨率为 11.3%, 如想测量更高能量中子, 能量分辨率会更差, 加之 T0 (测量得到质子打靶瞬间时间信号) 抖动, 测量误差会更大. 为此, 无法依靠具有较高准确度的飞行时间法对 1 MeV 以上能量中子能谱和注量率进行测量, 而依托蒙特卡罗粒子输运程序开展中高能中子输运计算并给出样品位置中子能谱和注量率的参考值几乎成为了唯一手段.

2.1 中子输运设置

MCNPX (Monte Carlo N-particle eXtended) 是一款基于蒙特卡罗方法的通用三维粒子输运模拟程序^[10], 通过随机抽样模拟中子、光子、电子等粒子在复杂几何结构中的输运过程, 并精确计算核反应、能量沉积及辐射剂量等物理量, 是国际公认的高精度粒子模拟基准工具. 该程序中, 低能端 ($E_n \leq 20$ MeV) 粒子输运过程清晰且所有计算基于评价核数据库, 模拟结果可真实反映相关辐射场; 而

高能端 ($E_n \geq 45$ MeV) 入射粒子能量高且可直接作用于原子核, 物理过程较为复杂, 如描述核内级联过程便涉及 BERTINI/INCL/CEM2K/ISABEL 等模型, 且缺乏核数据, 为此物理模型选取至关重要. 美国 WNR ICE HOUSE I 和 ICE-II 高能中子辐射效应测试终端因加速器单束团宽度窄 (约 1 ns)^[11] 和较远飞行距离 (约 20 m), 基于裂变电离室^[12] 和 FPGA 很好地开展了中子能谱的测量^[13], 这为利用 MCNPX 程序开展大气中子辐照谱仪的中子能谱、注量的评估中输运程序模型、计数卡、截面选取和设置等提供了有效的验证手段.

基于 WNR 靶体及质子能量信息^[6], 构建了 MCNPX 计算模型, 如图 1 所示, 质子竖直向上轰击靶体, 粒子输运计算时, 高能端所用物理模型均为 MCNPX 默认设置, 能谱计算时将 0.8—800 MeV 等对数分为 30 bins, 通过加大 NPS 和设置轮盘赌将每个 bin 的计算误差控制在 2% 以内, 探测器距离靶心 1 m.

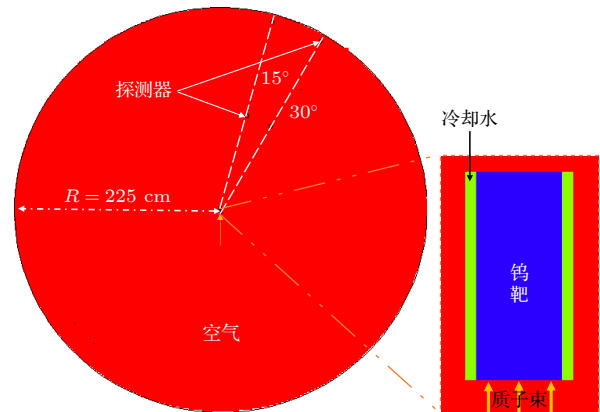


图 1 WNR-ICE MCNPX 计算模型
Fig. 1. WNR-ICE MCNPX model.

图 2 给出了 WNR 15° 方向上两种计数类型下所得中子能谱, 可以看出, 体探测器和点探测器结果在 $E_n \geq 20$ MeV 以上存在显著差异, 这是因为 MCNPX 内置体探测器 F4 和点探测器 F5 的计数算法存在差异, 对于 $E_n \leq 20$ MeV 能区, 中子输运基于评价核数据, 二者结果一致性好; 而对于 $E_n > 20$ MeV 能区, 无评价核数据可用, 算法导致差异明显体现. 考虑探测器距离靶心具体差异, 图 2 中左右两侧纵坐标保持同一比例关系, 体探测器模拟结果与文献 [6] 所示基本一致, 说明体探测器能反映真实辐射场, 因此, 选取体探测器记录中高能粒子 (质子/中子) 的输运计算.

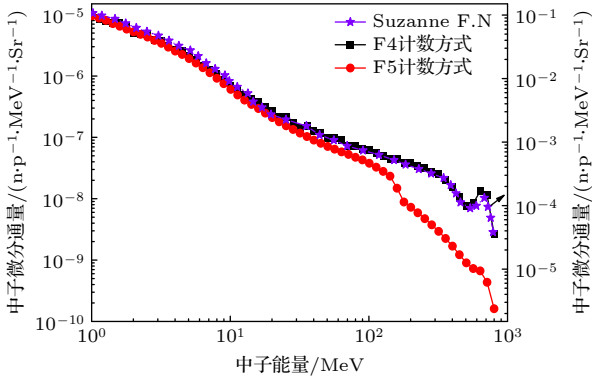


图2 WNR 15°中子能谱谱型结果对比

Fig. 2. Comparison of WNR 15° neutron energy spectrum results.

截面数据是MCNPX成为国际公认的高精度粒子模拟基准工具基础之一。MCNPX对于截面数据与模型选取采用了mix-and-match模式,即粒子根据其能量确定采用何种计算模式,当粒子能量高于截面数据能量上限时,计算将基于物理模型评估的基础参数开展;若粒子能量不超过截面数据能量上限时,则依托评价核数据进行。当前评价核数据能量上限为20 MeV,极少部分是30 MeV,同时也有La150n文件针对部分核素给出了上限150 MeV评价核数据。图3给出了截面数据不同能量上限的计算结果,在该模拟中,采用体探测器记录距离靶心1 m处且与质子入射方向呈15°角的中子能谱,高能端所采用的运输模型为BERTINI+RAL组合,截面数据分别采用能量上限为20和150 MeV核素截面。很明显,无论是对于中子能谱,还是1和10 MeV以上能区的中子积分注量,能量上限为20和150 MeV核素截面文件带来的差异基本可以忽略。高能粒子与物质相互作用的主要机制为散裂反应,MCNPX内置了BERTINI, INCL, CEM2K或ISABEL模型描述核内级联过程,预平衡、蒸发/裂变过程由EVAP, GEM, ABLA或RAL等模型描述^[10],然而不同模型构建基础存在差异,需明确哪种组合更能反映真实物理过程。在MCNPX中,核内级联过程默认核子输运采用BERTINI模型,蒸发/裂变过程默认设置为RAL。探测器与质子入射方向呈15°角时,不同核内级联模型与默认蒸发/裂变过程设置组合下的中子能谱与文献^[12]结果对比见图4,在较宽中子能量范围(1 MeV至数百MeV)中子能谱基本一致;而在 $E_n > 500$ MeV区间, BERTINI+RAL与CEM2K+RAL计算结果更接近文献数据。更进一步,基于ICE-House实

测中子能谱,评估了BERTINI+RAL与CEM2K+RAL之间的差异,如图5所示,在相同比例坐标系下, BERTINI+RAL, CEM2K+RAL的中子能谱谱型与基于FPGA所测ICE-HOUSE中子能谱^[13]、LANSCE WNR参考数据^[14]等谱型基本一致,在10—50 MeV区间三者结果略有差异,相比之下, BERTINI+RAL模型组合所得结果在10—50 MeV能区中子能谱变化趋势更接近实测值。由此认为,基于BERTINI+RAL模型组合的中高能核子输运可能更能够反映真实的物理过程。

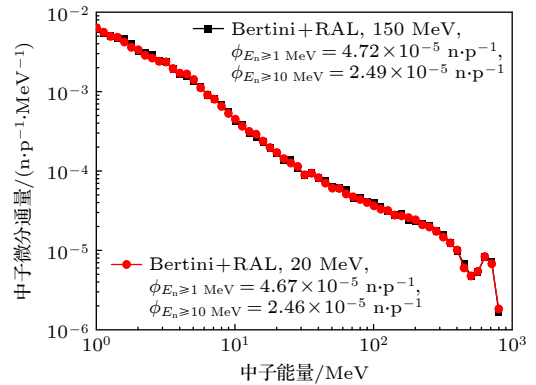


图3 WNR 15°不同截面能量上限中子能谱计算结果对比
Fig. 3. Comparison of calculated neutron energy spectra at WNR 15° angle with different upper limits of energy for cross-sections.

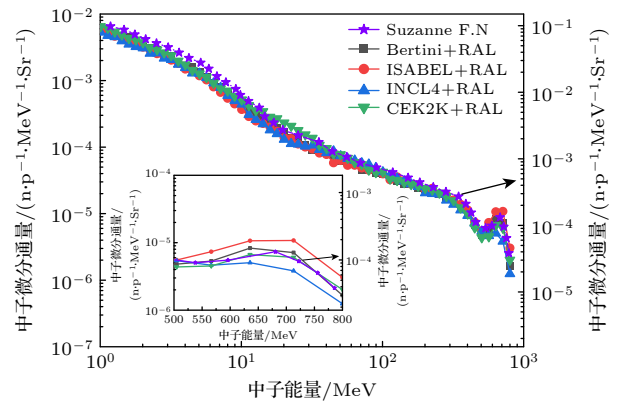


图4 WNR 15°中子能谱与MCNPX不同模型计算结果对比
Fig. 4. Comparison of calculated neutron energy spectra at WNR 15° angle with different physical model of spallation reaction.

基于LANSCE WNR计算及与实测数据反演,认为利用MCNPX2.5.0开展较高能(能量大于45 MeV)粒子输运计算时,宜采用BERTINI+RAL模型组合、F4计数卡、尽量选取能量上限为150 MeV核数据等设置。中国散裂中子源大气中子辐照谱仪中子能谱与注量的评估均以此为基础。

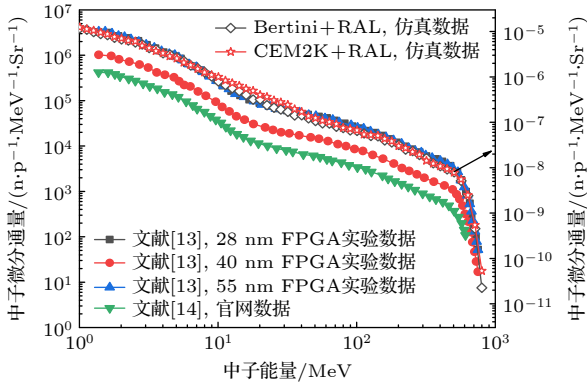


图5 WNR ICE-HOUSE 实测中子能谱与 MCNPX 不同模型计算结果对比

Fig. 5. Comparison of measured neutron energy spectra of ICE-HOUSE with calculation by different physical model in MCNPX.

2.2 二次源项

基于蒙特卡罗方法的通用三维粒子输运程序可模拟解决复杂几何结构中的输运问题, 如 MCNPX, PHITS, GEANT, FLUKA 等, 对于较小几何结构的输运问题, 一般通过加大 NPS 和设置轮盘赌等手段可在合理的计算时间和误差控制精度下精确计算相关物理量. 而对于具有较大尺寸的复杂几何结构 (如中国散裂中子源的靶站和大气中子辐照谱仪组合体), 若想评估远离束流中心区域某个小尺寸栅元中的物理量 (如位置距离靶心 25 m, 1 cm×1 cm×5 mm 样品尺寸上的中子能谱), 且要求计算时间合理、较小能量 bin 宽具有较好的统计性 (如统计误差最大值小于 5%) 等, 现有通用三维粒子输运程序无法一步到位, 可选手段就是接续计算. 中国散裂中子源大气中子辐照谱仪中子能谱和注量的评估方案: 依据装置工程模型建立靶站和谱仪全尺寸 MCNPX 模型, 在靶站和谱仪连接处构建接续计算中间源项, 然后再开展辐照间不同位置的中子能谱和注量计算.

二次源项基于靶体-慢化器-反射体 (TMR) 工程模型, 在大气中子辐照谱仪引出孔处设置多个探测器, 同时记录多个区域带角分布的中子能谱. 图 6(a) 和图 6(b) 分别给出了计算模型和 10 MeV 以上中子空间分布. 考虑到大气中子是从靶侧引出, 以中高能中子为主, 为减少从反射体杂散过来的中子, 在几何设置中将部分反射体区域设为真空, 且体探测器尽量靠近靶体, 同时记录与体探测器法线方向呈 $0^\circ-0.5^\circ$ 和 $0.5^\circ-1.16^\circ$ 内中子. 图 6(b)

给出了垂直于大气中子束流方向 8 cm×8 cm 空间上记录 10 MeV 以上中子的空间分布, 从图中可知, 大气中子孔道可视面上中高能中子分布不均匀, 大体上沿质子束流中心线在竖直方向上呈对称分布, 水平方向上顺着束流方向 $E_n \geq 10$ MeV 中子注量逐渐降低. 在基于二次源项的接续计算中, 因为要真实反映辐射场, 在二次源项的产生设置中, 同时记录了粒子种类、角度分布、能量分布、空间分布等信息.

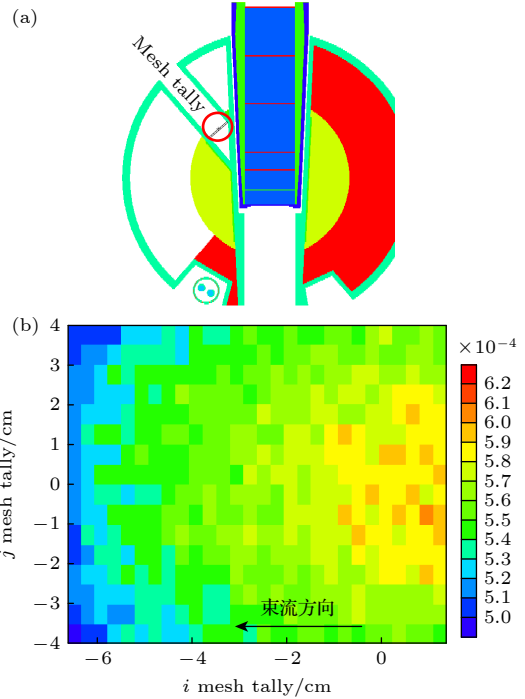


图6 基于 TMR 模型的 ANIS 引出孔道 $E_n \geq 10$ MeV 中子注量评估模型和空间分布 (a) MCNPX ANIS 源项评估计算模型; (b) $E_n \geq 10$ MeV 中子注量空间分布

Fig. 6. Source term assessment model and spatial distribution of neutron flux with $E_n \geq 10$ MeV of ANIS based on CSNS-TMR: (a) Source term assessment model of ANIS in MCNPX; (b) spatial distribution of neutron flux with $E_n \geq 10$ MeV.

根据大气中子辐照谱仪工程设计, 光路上严格按照实际尺寸和材料设置, 不做任何简化, 大气中子依次穿过第一段中子飞行管、第一准直器、偏转磁铁、第二中子飞行管、第二准直器进入辐照间, 在与样品作用后进入束流垃圾桶. 工程实践中靠近光路区域为低碳钢屏蔽体, 其外围采用混凝土再屏蔽, 计算模型中考虑到外围设置不影响光路上的物理量评估, 故而计算模型就此部分予以简化处理, 具体见图 7. 二次源项产生设置: 1) 只记录中子, 带电粒子可通过磁铁予以偏转, 光子能量在 MeV

级别, 无法通过光核反应产生中子或产额极低; 2) 考虑到中子空间分布不均匀, 将大气中子引出孔道细分为 8×8 个体栅元, 且尽量靠近靶体; 3) 针对中子能谱, 对 1 MeV 以上能区中子, 能量 bin 划分较细, 而对于超热及以下能区中子, 能量 bin 稍宽; 4) 辐照间距离靶体中心最近距离为 20 m, 具有较大角度中子无法直接达到辐照间, 为此只考虑与孔道垂直面的法线所成角度小于 1.16° 中子。

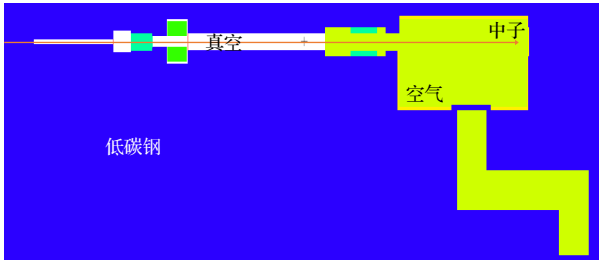


图 7 ANIS 简化版 MCNPX 模型
Fig. 7. ANIS simplified MCNPX model.

图 8 对比了基于二次中子源项, 第一准直器处于 4 号孔道、第二准直器处于 1 号孔道, 距离靶体中心 20.8 m 处 $E_n \geq 10$ MeV 以上中子注量空间分布。图 8 中虚线为采用金刚石探测器, 基于飞行时间法, 通过扫描获得水平方向和竖直方向空间分布; 实线为基于二次源项接续计算结果, 对比发现二者基本一致, 这在一定程度上验证了二次中子源项的正确性。

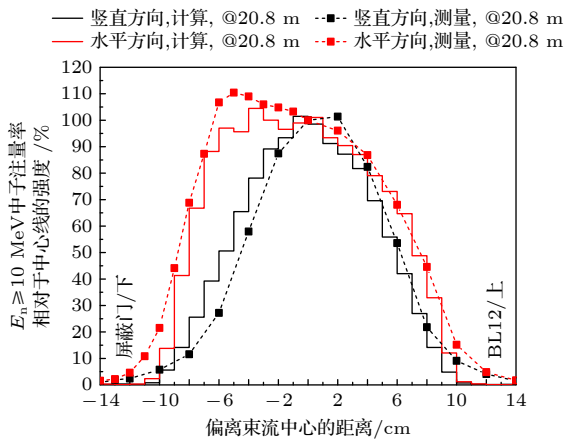


图 8 二次中子源项的空间分布校验
Fig. 8. Verification of the spatial distribution of the secondary neutron source term.

综上, 大气中子辐照谱仪中子能谱和注量的评估均基于以下设置: 1) 高能端物理模型采用默认设置, 即 BERTINI+RAL; 2) 中子能谱和注量评估基于 F4 计数卡; 3) 核素截面数据尽量使用能量

上限为 150 MeV 文件; 4) 二次源项及输运计算主要考虑中子, 由 64 个面源组成, 考虑空间分布、角度分布和能量分布。

3 中子能谱谱型评估

基于上述粒子蒙特卡罗粒子输运设置和二次源项, 以 I5-II3 工况为例 (第一级准直器处于五孔道、第二级准直器处于三孔道、未使用通量调节器和热中子过滤器) 模拟获得了距离靶心 24.5 m 处中子能谱, 如图 9 黑色实心方框所示, 中子能量覆盖 meV 到 GeV, 其谱型与 IEC 62396-1 所推荐民航高度参考大气中子能谱基本一致。如将大气中子按 1—10 MeV, 10—100 MeV 和 >100 MeV 划分能群, 分别计算各能群中子注量率相对于 $E_n > 1$ MeV 中子注量率的百分比, 各装置及相关标准参考能谱如表 1 所列 [15]。CSNS ANIS 中子能谱在各组分中的比值与国际通用标准 (航空: IEC 62396-1: 2016; 地面: JESD89A: 2012) 所推荐大气中子能谱占比一致, 且明显优于其他国际同类装置。

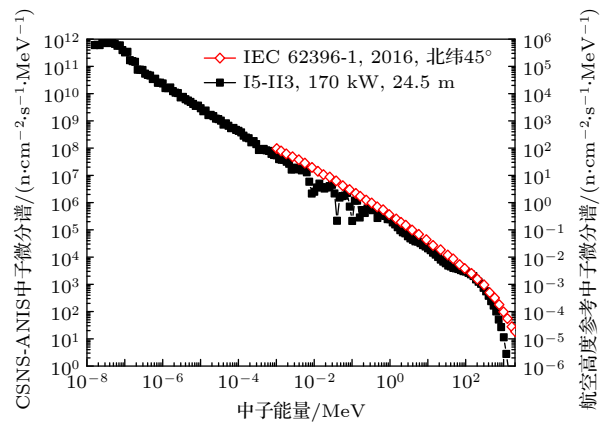


图 9 CSNS ANIS 与航空大气中子能谱对比
Fig. 9. Comparison of CSNS ANIS neutron spectra with avionics neutron spectra.

表 1 大气中子能谱占比 [15] (单位: %)

Table 1. Spectral distribution of atmospheric neutron energies (in %) [15].

源	1—10 MeV	10—100 MeV	>100 MeV
IEC 62396-1	35	35	29
JESD89 A	35	35	30
QARM (model)	40	36	24
LANSCE WNR	52	26	22
TRIUMF TNF	24	54	21
CSNS ANIS	35	35	30

国内外可用于开展地面大气中子加速测试装置有 5 个, 分别是乌普萨拉大学的 ANTIA^[16]、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 WNR^[6]、加拿大的 TRUMIF^[17]、英国散裂中子源的 ChipIR^[7] 以及中国散裂中子源大气中子辐照谱仪 ANIS^[8]. 考虑到当前半导体工艺制程在纳米级别, 基于上述装置开展大气中子单粒子效应时, 1—10 MeV 能量区间中子引起的单粒子效应不可忽略^[9]. 图 10 中将各装置及 JESD89A 参考大气中子对 $E_n \geq 1$ MeV 能区进行积分并作归一化处理, 然后再将中子能谱转变为勒谱. 相对于其他装置, ANIS 与 JESD89A 参考大气中子勒谱谱型结果更接近, 二者在 $E_n \geq 10$ MeV 区间谱型和峰位吻合最好, 在 1—10 MeV 区间二者也基本相似, 且中国散裂中子源入射质子能量为 1.6 GeV, 大气中子最高能量可达 GeV, 这是 ChipIR 和 WNR 所不具备的.

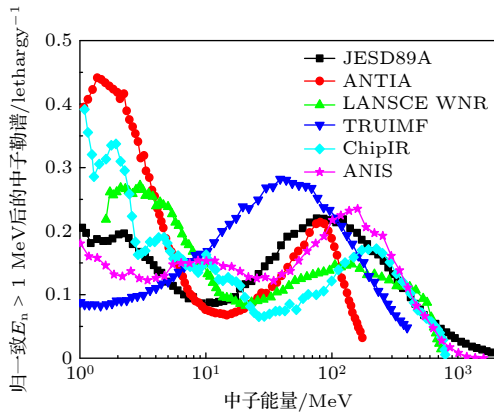


图 10 归一化后不同装置和地面参考大气中子的中子勒谱
Fig. 10. Neutron spectra of different facilities and ground reference atmospheric neutrons after normalization.

为定量评估不同大气中子辐射场下器件辐射效应差异^[18], 定义:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_r} = \frac{\int_0^\infty \sigma(E)\phi_s(E)dE}{\int_0^\infty \sigma(E)\phi_r(E)dE} - 1, \quad (1)$$

其中 E 为中子能量, 单位为 MeV; $\phi_s(E)$ 为待考察中子辐射场能谱; $\phi_r(E)$ 选定 JESD89 A 所述自然条件下大气中子能谱作为参考中子辐射场; $\sigma(E)$ 为器件中子单粒子翻转截面; σ_s 和 σ_r 分别为器件单粒子翻转与两个中子辐射场中子能谱的积分值.

考虑现代半导体工艺制程, 1—10 MeV 能量区间中子引起的单粒子效应不可忽略. 假定某个

SRAM 器件单粒子翻转截面随中子能量变化服从威布尔分布^[18]:

$$\sigma(E) = 7.23 \times 10^{-13} \times \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{E - 0.5}{79.11} \right]^{1.29} \right\}$$

将国内外各地面大气中子加速测试装置的中子勒谱 (详见图 10) 和单粒子翻转截面代入 (1) 式, 计算得到各装置大气中子相对于真实自然条件下大气中子引起的辐射效应差异如表 2 所列.

表 2 各装置相对于 JESD89A 参考大气中子引起的辐射效应差异对比

Table 2. Comparison of the differences in radiation effects caused by atmospheric neutrons in various facilities reference JESD89A.

装置名称	ANTIA	LANSCE	TRUMIF	ChipIR	ANIS
辐射效应差异 ε / %	-59	-26	-16	-25	-2

表 2 以 JESD89A 中纽约户外海平面 1 MeV 以上中子能谱为参考辐射场, 从辐射效应角度对比了国际同类装置之间的差异, 表中 ANIS 与 JESD89A 所述辐射场引起中子单粒子翻转的差异最小, 优于其他装置. 从大气中子微分谱、中子勒谱以及辐射效应差异等方面来看, ANIS 中子能谱最接近自然条件下中子能谱, 且装置性能明显优于国际其他同类装置.

4 SEU 对比验证

开展大气中子辐照谱仪单粒子效应的评估, 可用手段有: 1) 同一器件或系统, 在国际同类装置上开展单粒子效应实验, 基于实验数据予以评估^[19]; 2) 基于某款元器件, 将大气中子辐照终端测试数据与真实高海拔自然条件下的大规模阵列长时间测量结果进行对比^[20,21]. 当前, 基于国产 SRAM 阵列的单粒子效应等效研究正在稻城海子山开展. Xilinx 器件可靠性报告^[22] 汇总了一系列产品可靠性数据, 如大气中子单粒子效应截面数据, 白皮书《Virtex and Spartan FPGA Families》^[19] 更是给出了 XC2 V6000 在 LANSCE, ChipIR 和 ANITA 等实测结果, 这为同类装置开展对比实验提供了可能.

实验选取与 XC2V6000 同系列 150 nm 工艺 XC2V3000 FPGA 开展, 实验所用测试系统包括辐照板、测试板和上位机三个模块, 其中辐照板和测试板通过柔性扁平线缆相连, 考虑到测试时中子

束流对测试板的影响,为减少不确定性,辐照板和测试板在设计时二者相隔 15 cm. 辐照板是一个集成电路板,测试仅针对 FPGA 配置存储器进行操作,测试容量为 1.5 Mbit. 实验时,调节束斑面积,使束流分布均匀区域覆盖器件表面的同时尽量小,测试板响应上位机指令,对辐照板上的 CRAM 进行读写操作,对比读出和写入数据进而判断是否发生 SEU,并将判断结果、SEU 地址及时间等信息实时回传,上位机监控整个实验流程,实验现场布置如图 11 所示.

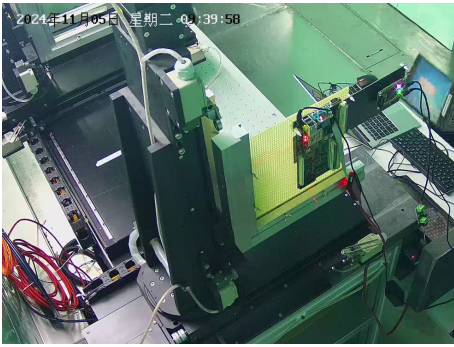


图 11 XC2 V3000 测试现场
Fig. 11. XC2 V3000 test site.

实验在 I3-II5 (第一准直器 3 号孔位、第二准直器 5 号孔位,未使用通量调节器和热中子过滤器,磁铁启用以偏离带电粒子) 工况下开展. 实验时红色激光交叉处为大气中子束流中心,样品距离靶心 20.8 m,中子束流参数根据前文所述方法计算获得,结合加速器运行功率,实测单粒子翻转事件 144 个,考虑到 150 nm 工艺尺寸及其他装置结果,使用 10 MeV 以上中子计算其翻转截面,相应时间内累积中子注量约 $2.63 \times 10^9 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$,据此可得 XC2V3000 单粒子翻转截面约为 $3.47 \times 10^{-14} \text{ cm}^2\cdot\text{bit}^{-1}$. 测试误差主要来自: 1) 基于蒙特卡罗输运计算中子注量误差; 2) 加速器质子流强统计误差; 3) 实验时中子束流开关启停带来的时间误差; 4) 单粒子翻转事件统计误差.

表 3 Xilinx-II 系列 FPGA 不同装置测试结果^[19]

Table 3. Test results of Xilinx-II series FPGA on different devices^[19].

装置简称	翻转截面/($\text{cm}^2\cdot\text{bit}^{-1}$) (误差)	备注
LANSCE	2.56×10^{-14} ($\pm 10\%$)	XC2V6000
ISIS	4.35×10^{-14} ($\pm 5\%$)	XC2V6000
ANITA	5.25×10^{-14} ($\pm 7.5\%$)	XC2V6000
ANIS	3.47×10^{-14} ($\pm 8\%$)	XC2V3000

表 3 列出了 XC2V6000 和 XC2V3000 在不同装置上的测试结果,虽然测试芯片非同一款、同一批次,但工艺制程相同且为同一系列,ANIS 测试结果介于 LANSCE WNR 和 ISIS ChipIR 之间,同类装置测试结果相比,一致性较好,具备较强的参考价值.

5 结 论

中国散裂中子源大气中子辐照谱仪中子能量覆盖 meV—GeV, 1 MeV 以上能区的中子能谱及注量评估对开展大气中子单粒子效应极为重要. 基于 LANSCE WNR 中子能谱实测数据,明确利用 MCNPX2.5.0 开展较高能 (能量大于 45 MeV) 粒子输运计算时,宜采用 BERTINI+RAL 模型组合、F4 计数卡、尽量选取能量上限为 150 MeV 核数据等设置. 针对大型且具有复杂结构几何体,产生了具有能量分布、角度分布和空间分布的二次源项,并从空间分布角度验证了源项的正确性. 基于二次源项开展了大气中子辐照谱仪中子能谱和注量的计算,结合国际上现有同类装置及 JSED89 A 参考中子能谱,从大气中子微分谱、中子能谱以及辐射效应差异等方面来看,ANIS 中子能谱最接近自然条件下的中子能谱,且装置性能明显优于国际其他同类装置. 最后对比了同系列 Xilinx II 代 FPGA 在不同装置上的测试结果,XC2V3000 在 ANIS 上测试结果介于 XC2V6000 在 LANSCE WNR 与 ISIS ChipIR 之间,在一定程度上论证了测试结果的一致性. 综上认为中国散裂中子源大气中子辐照谱仪可能是同类装置最接近自然条件大气中子能谱的装置,且同类装置测试结果具有很好的一致性. 基于中国散裂中子源大气中子辐照谱仪开展的大气中子单粒子效应研究与工程加速试验结果可直接应用于航空、航天、军事、民用等可靠性领域,助力新质生产力的发展.

参考文献

- [1] Chen W, Guo X Q, Song Z H 2022 *Neutron Single Event Effects* (Beijing: Science Press) pp5-11 (in Chinese) [陈伟, 郭晓强, 宋朝晖 2022 中子单粒子效应 (北京: 科学出版社) 第 5—11 页]
- [2] Ziegler J F 1996 *IBM J. Res. Dev.* **40** 19
- [3] Sun Y, Liu G F, Luo X L 2014 *National Defense Sci. Technol.* **35** 24 (in Chinese) [孙雅, 刘国福, 罗晓亮 2014 国防科技 **35** 24]
- [4] Normand E 1996 *IEEE Trans Nucl Sci.* **43** 461

- [5] ATSB Transport Safety Report: In-flight Upset 154 km West of Learmonth, WA 2008 <http://www.airsafe.com/plane-crash/atsb-qantas-a330-interim-report1.pdf> [2025-07-22]
- [6] Suzanne F N, Stephen A W, Michael M 2017 *Physics Procedia* **90** 374
- [7] Ansell S, Frost C D 2007 *9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems* Deauville, France, September 10–14, 2007 pp1–4
- [8] Yu Q Z, Shen F, Yuan L B, Lin L, Hu Z L, Zhou B, Liang T J 2022 *Nucl. Eng. Des.* **386** 111579
- [9] IEC 2016 *Process Management for Avionics-atmospheric Radiation Effects, part 1: Accommodation of Atmospheric Radiation Effects Via Single Event Effects Within Avionic Electronic Equip-ment: IEC 62396-1*
- [10] Denise B P 2005 LA-CP-05-0369, Los Alamos National Laboratory
- [11] Steve W 2019 LA-UR 19-30813, Los Alamos National Laboratory
- [12] Balestrini S, Brown A, Haight R C, Laymon C M, Lee T M, Lisowski P W, McCorkle W, Nelson R O, Parker W 1993 *NIM-A* **336** 226
- [13] Hidenori I, Gentaro F, Hirotaka S, Takashi K, Michihiro F, Stephen A W 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 2363
- [14] ICE House at LANSCE <https://lansce.lanl.gov/facilities/Radiation%20Effects/ICE%20House-FP30L.php> [2025-07-22]
- [15] IEC 2017 *Process Management for Avionics-atmospheric Radiation Effects-Part 2 Guidelines for Single Event Effects Testing for Avionics Systems. IEC 62396-2*
- [16] Alexander V P, Jan B, Mitja M, Ralf N, Stefan R, Simon P P 2009 *IEEE Radiation Effects Data Workshop* Canada Quebec, July 20–24, 2009 pp166–173
- [17] Ewart W B 2009 *IEEE Radiation Effects Data Workshop* Canada Quebec, July 20–24, 2009 pp157–160
- [18] Hu Z L 2023 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an JiaoTong University) (in Chinese) [胡志良 2023 博士学位论文 (西安: 西安交通大学)]
- [19] Austin L 2009 *White Paper: Virtex and Spartan FPGA Families*, WP286
- [20] Antran J L, Munteanua D, Moindjie S, Saoud T S, Sauze S, Gasiot G, Roche P 2015 *Microelectron. Reliab.* **55** 1506
- [21] Zhang Z G, Lei Z F, Tong T, Li X H, Xi K, Peng C, Shi Q, He Y J, Huang Y, En Y F 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 1368
- [22] Device vice Reliability Report (UG116) <https://docs.amd.com/r/en-US/ug116> [2025-07-22]

Evaluation of neutron energy spectrum, fluence and single event effects of atmospheric neutron irradiation spectrometer at China spallation neutron source

HU Zhiliang^{1)2)3)†} MO Lihua¹⁾²⁾³⁾ ZHOU Bin¹⁾²⁾³⁾ YI Tiancheng¹⁾²⁾³⁾

LI Mengchao¹⁾²⁾ ZHAO Qi¹⁾²⁾ LIANG Tianjiao^{1)2)3)‡}

1) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China*)

3) (*Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Neutron Scattering Science and Technology, Dongguan 523800, China*)

(Received 22 July 2025; revised manuscript received 11 August 2025)

Abstract

The neutron energy spectrum and fluence of the atmospheric neutron irradiation spectrometer at China Spallation Neutron Source cover the energy range from meV to GeV. The evaluation of the neutron energy spectrum and fluence in an energy region above 1 MeV is of great significance for studying single event effect of atmospheric neutrons. Due to the limitations of the proton beam time structure of the CSNS and the engineering reality of the ANIS, it is impossible to achieve the neutron energy spectrum and fluence above 1 MeV through absolute measurements. Therefore, it is necessary to adopt a combination of theoretical simulations and partial experiments to provide reference values. This work covers the following aspects. 1) Based on the measured neutron energy spectrum data from the ICE beamline at LANSCE WNR, the physical models, tally types, and cross-section data files suitable for the calculation of high energy neutron energy spectra and fluence are explored using MCNPX2.5.0; 2) A secondary source with energy distribution, angular distribution, and spatial distribution for neutron energy spectrum and fluence evaluation is developed and verified. 3) Using the obtained neutron energy spectrum and fluence and the combination of existing facilities and JSED89A reference neutron energy spectrum, the performance of the ANIS facility is evaluated from the perspectives of spectrum shape and radiation effect. 4) An experiment on neutron induced single-event upset cross-section measurement of configuration memory on Xilinx 2nd generation FPGAs is conducted using the ANIS. The results are consistent with test results of the same chip series on similar international facilities.

In summary, it can be concluded that the ANIS at CSNS may be the facility with the neutron energy spectrum closest to the natural atmospheric neutron energy spectrum among similar facilities in the world, and it has also been confirmed that the test results of ANIS from CSNS show excellent consistency with results obtained from other facilities. Therefore, the research results on atmospheric neutron single-particle effects and engineering acceleration tests based on ANIS at CSNS can be directly applied to high-reliability fields such as aviation, aerospace, military, and civil, contributing to the development of new quality productive forces.

Keywords: atmospheric neutron irradiation spectrometer, neutron energy spectrum, neutron fluence, single event effect

PACS: 29.30.Kv, 61.80.Hg, 02.70.Uu

DOI: [10.7498/aps.74.20250975](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250975)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250975](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250975)

† Corresponding author. E-mail: huzl@ihep.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: tjliang@ihep.ac.cn

中国散裂中子源大气中子辐照谱仪的大气中子能谱及单粒子效应评估

胡志良 莫莉华 周斌 易天成 李梦朝 赵齐 梁天骄

Evaluation of neutron energy spectrum, fluence and single event effects of atmospheric neutron irradiation spectrometer at China spallation neutron source

HU Zhiliang MO Lihua ZHOU Bin YI Tiancheng LI Mengchao ZHAO Qi LIANG Tianjiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 192901 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250975

CSTR: 32037.14.aps.74.20250975

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250975>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近存计算架构AI芯片中子单粒子效应

Neutron induced single event effects on near-memory computing architecture AI chips

物理学报. 2024, 73(13): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240430>

中国散裂中子源缪子谱仪及其应用展望

Muon spectrometers on China Spallation Neutron Source and its application prospects

物理学报. 2024, 73(19): 197602 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240926>

非弹性中子散射谱仪及其应用

Inelastic neutron scattering spectrometer and its applications

物理学报. 2025, 74(1): 012501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241412>

基于中国散裂中子源反角白光中子束线的天然锂中子全截面测量

Measurement of total neutron cross section of natural lithium at China Spallation Neutron Source Back-n facility

物理学报. 2022, 71(5): 052901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211646>

质子辐照下正照式和背照式图像传感器的单粒子瞬态效应

Single event transient effect of frontside and backside illumination image sensors under proton irradiation

物理学报. 2022, 71(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211838>

中国散裂中子源二期靶站关键部件辐照损伤模拟计算

Calculation of radiation damage of key components of China Spallation Neutron Source II target station

物理学报. 2024, 73(9): 092501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240088>