

基于TALYS的Geant4中子产额修正方法研究

姜轶剑, 程 捷, 路浩奇, 王耀光

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年7月10日

摘 要

深地低本底粒子探测实验中, 宇宙线缪子产生的中子是重要本底来源, 中子产额模拟精度直接影响本底评估可靠性。已有研究表明, Geant4 在有机液体闪烁体中的中子产额预测存在系统偏差, 主要与其中低能区($E < 200$ MeV) 强子-核非弹性反应截面参数化近似有关。本文提出一种基于TALYS 核反应计算的Geant4 中子产额修正方法, 在保持Geant4 级联结构和末态运动学分布不变的基础上, 利用TALYS 截面数据对中低能次级中子、质子和伽马射线与 ^{12}C 的非弹性反应概率进行离线逐顶点重赋权。与大亚湾实验测量值比较, FTFP_BERT_HP 偏差由+20.0% 降至+6.04%, QGSP_BIC_HP 由+13.0% 降至-0.39%。结果表明, 该方法可显著改善液闪中子产额模拟精度, 为深地低本底实验中子本底研究提供有效修正途径。

关键词

Geant4, TALYS, 中子产额, 有机液闪体, 截面修正, 本底模拟

Study on a TALYS-Based Correction Method for Neutron Yield in Geant4

Yijian Jiang, Jie Cheng, Haoqi Lu, Yaoguang Wang

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: April 25, 2026; accepted: May 6, 2026; published: July 10, 2026

Abstract

In deep underground low-background particle detection experiments, neutrons induced by cosmic-ray muons constitute one of the dominant background sources limiting the detector sensitivity. The neutron yield, which characterizes the neutron production capability of muons traversing matter, is a key physical observable whose simulation accuracy directly impacts the reliability of muon-induced background studies. Previous studies have indicated that the Geant4 Monte Carlo particle transport toolkit exhibits systematic deviations in predicting neutron yields in organic liquid scintillators. One of the primary sources of this discrepancy arises from the use of parameterized approximations for hadron–nucleus inelastic cross sections in the intermediate and low energy range ($E < 200$ MeV). To address this issue, we propose a correction method for neutron yield simulations in Geant4 based on nuclear reaction cross sections calculated with the TALYS code. While preserving the original cascade structure and final-state kinematic distributions in Geant4, this method employs high-precision cross section data from TALYS to perform an offline, vertex-by-vertex reweighting of inelastic interaction probabilities for secondary neutrons, protons, and gamma rays on ^{12}C in the intermediate and low energy region. A comparison with measurements from the Daya Bay neutrino experiment demonstrates that, after incorporating TALYS-based cross sections, the relative deviations in neutron yield are significantly reduced for both physics lists. Specifically, the discrepancy for FTFP_BERT_HP decreases from +20.0% to +6.04%, while that for QGSP_BIC_HP improves from +13.0% to -0.39%. The corrected simulation results show substantially improved agreement with experimental data. This approach provides an effective pathway to enhance the predictive accuracy of Geant4 for neutron yields in liquid scintillators, and offers a refined methodology for modeling muon-induced neutron backgrounds in deep underground low-background experiments.

Keywords

Geant4, TALYS, Neutron Yield, Liquid Scintillator, Cross-Section Correction, Background Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 散裂中子本底模拟的研究背景

随着中微子物理、无中微子双贝塔衰变以及暗物质直接探测等研究不断发展,部署于深地下环境中的低放射性本底粒子探测实验(以下简称深地低本底实验)对本底控制和模拟精度都提出了更高要求 [1]- [3]。厚重岩层虽然能够有效削弱海平面宇宙射线中的大部分强子和电磁成分,但仍有少量高能宇宙线缪子(cosmic-ray muons)可以穿透覆盖层进入实验大厅。这些缪子在有机液体闪烁体介质(liquid scintillator, LS)及周围材料中传播时,会通过光核反应、韧致辐射以及次级强子反应等过程产生大量中子,从而形成与实验信号高度相关的本底 [1] [2]。

在这类研究中,中子产额(neutron yield)被定义为单位缪子数、单位路径长度和单位介质密度下产生的平均中子数。该物理量能够反映缪子产生中子的总体强度,已成为评价探测器中子本底水平和比较不同实验结果的重要指标 [4]- [6]。对中子产额进行可靠模拟,不仅有助于实验设计阶段的本底估算,也有助于后续数据分析中的系统误差控制 [1] [2]。

1.2. Geant4局限与TALYS反应截面及其优势

Geant4 是高能物理与核物理领域广泛使用的粒子输运蒙特卡罗模拟程序,能够处理复杂几何结构中的粒子输运及相互作用过程 [7]- [9]。在深地低本底实验的本底研究中,Geant4 常被用于模拟宇宙线缪子在探测器材料中的能量沉积、次级粒子产生以及中子输运过程 [7] [8]。

然而,已有液体闪烁体(LS) 实验和相关模拟研究表明,Geant4 在特定物理列表和模拟条件下对中子产额的预测与实验测量存在差异 [4]- [6]。进一步分析表明,这种偏差主要来源于次级粒子在中低能区($E < 200$ MeV) 的强子-核非弹性反应模型近似,而非高能缪子本身的模拟 [1] [2]。对于LS这类以碳、氢为主要成分的介质,中子、质子和伽马射线与 ^{12}C 之间的反应截面一旦出现系统性偏差,就会在多级级联过程中被逐步放大,最终导致宏观中子产额预测偏离实验测量 [4]- [6]。

TALYS是面向核反应研究的理论计算程序,适用于1keV - 200MeV能区内多种入射粒子与原子核相互作用的描述 [10] [11]。与Geant4中基于半经验近似的核内级联模型(如BERT、BIC)不同,TALYS在处理轻核反应时综合使用了光学模型、预平衡模型以及Hauser-Feshbach统计理论,能够提供更高精度的非弹性反应截面 [10]。

针对中子产额模拟的修正需求TALYS的作用并非替代Geant4的完整输运框架,而是为其提供高精度核反应截面数据作为外部约束。特别是在中低能区,TALYS给出的 n 、 p 、 γ 与 ^{12}C 作用的非弹性截面数据,可为分析Geant4模型偏差来源及构建截面修正关系提供依据 [10] [11]。

1.3. 本文的主要工作

本文围绕Geant4在LS中中子产额预测存在的偏差问题,提出基于TALYS反应截面对Geant4进行修正的方法。文章首先分析宇宙线缪子产生中子的主要物理机制与Geant4中的相关模型设置;随后建立基于TALYS核反应数据的离线逐顶点重赋权修正模型,在不改变Geant4末态粒子运动学分布的条件下,修正中低能区非弹性反应通道的发生概率;最后比较修正前后模型在中子产额预测上的差异,并结合大亚湾实验测量结果验证该方法的有效性。

2. 中子产生机制与模拟框架

2.1. 宇宙线缪子产生中子的级联过程及次级粒子贡献

高能宇宙线缪子穿过LS时,中子的产生通常并非单一反应造成,而是一个由电磁相互作用、强子相互作用及核反应共同构成的级联过程 [1] [2]。缪子本身可以通过虚光子交换与原子核发生相互作用,也可通过韧致辐射产生高能 γ 射线。初级反应生成的 γ 射线、 n 、 p 以及介子随后继续在介质中传播,与靶核发生非弹性碰撞,进一步产生新的次级中子 [1]- [5]。

在这一过程中,中低能区次级粒子与 ^{12}C 的非弹性反应对中子产额具有重要影响。例如,中子发生的 $(n, 2n)$ 反应、质子发生的 (p, pn) 反应以及 γ 射线引发的光核反应,都会直接改变级联过程中产生新中子的能力。由于中子产额是大量微观反应综合叠加的结果,关键能区内反应截面的系统性偏差会在最终统计结果中显著放大 [10] [11]。

在LS介质中,次级中子通常在后续新中子产生中起主要作用,尤其是在几十至数百MeV范围内,中子与碳核的非弹性散射是总中子产额的直接来源之一。相比之下,质子虽然也有贡献,但总体上弱于中子,但其能量分布更偏向高能区,因此在级联初期仍可能对后续反应产生明显放大效应 [1] [2]。

γ 射线的作用则主要体现在光核反应上。高能 γ 射线与 ^{12}C 作用时,可能触发多体碎裂过程并产生额外中子。若模型对这些光核反应通道的贡献估计偏高,将导致中子产额预测值偏高。因此,借助 n 、 p 、 γ 与 ^{12}C 更可靠的截面数据约束相关反应通道,是改善中子产额预测的有效途径 [10] [11]。

2.2. Geant4物理列表与中子产额定义

本文基于Geant4 11.2.1构建LS介质中的缪子产生中子模拟框架 [9]。研究对象为典型有机液体闪烁体,其主要元素为碳和氢,重点研究缪子及其次级粒子在靶区介质中的非弹性相互作用及中子产生过程。为比较不同核内级联模型对中子产额的影响,本文选取了两种常用强子物理列表 [9]:

- **FTEP_BERT_HP**: 高能区采用Fritiof弦模型,中低能区采用Bertini核内级联模型(Bertini intranuclear cascade model, BERT);
- **QGSP_BIC_HP**: 高能区采用夸克-胶子弦模型,中低能区对核子采用Binary级联模型(Binary cascade model, BIC),而对介子和 γ 射线仍保留BERT模型。

两种物理列表均包含高精度低能中子数据模块(High Precision, HP),以保证低于20 MeV的中

子输运、慢化和俘获过程得到精确处理 [9]。本文关注的是中低能区非弹性反应对 neutron 产生的影响，因此比较重点为不同级联模型下中子产额预测的差异，以及引入 TALYS 截面修正后的变化。

如图 1 所示，本文采用的典型 Geant4 强子物理列表在高能区弦模型和中低能区核内级联模型的选取上存在差异。其中，FTFP_BERT_HP 与 QGSP_BIC_HP 在中低能区采用了不同的级联模型，这也是后续比较中子产额差异时的主要来源。

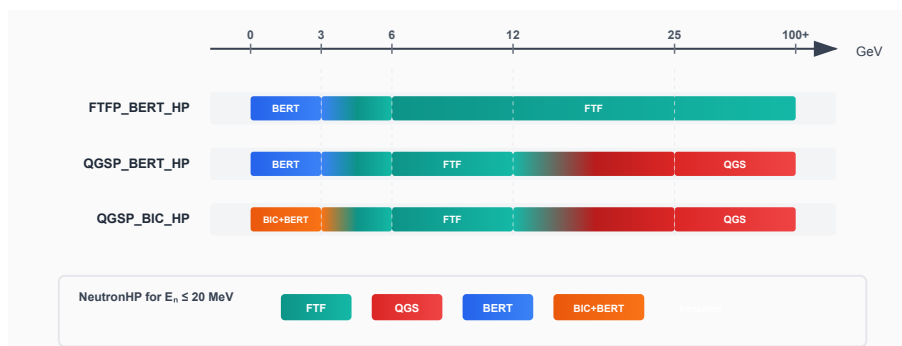


Figure 1. Composition and applicable energy ranges of Geant4 hadronic physics lists used in this work

图 1. 本文采用的 Geant4 强子物理列表组成及能区适用范围示意图

图 1 中展示了三种常见的 Geant4 强子物理列表，用于说明不同物理列表在高能弦模型和中低能区核内级联模型上的组成差异。本文在后续分析中主要选取 FTFP_BERT_HP 与 QGSP_BIC_HP 两种物理列表作为比较对象。其中，FTFP_BERT_HP 代表 BERT 类模型，QGSP_BIC_HP 代表 BIC 类模型；QGSP_BERT_HP 在本文关注的中低能区与 FTFP_BERT_HP 同样采用 BERT 级联模型，预期结果趋势与 BERT 类模型总体一致，故不再另行分析。这样处理有助于突出中子产额差异主要来源于 BERT 与 BIC 在中低能区核内级联处理上的不同，而非高能弦模型本身。

2.3. 中子产额定义

本文采用的中子产额定义为

$$Y_n = \frac{N_n}{N_\mu \cdot L_{\text{avg}} \cdot \rho}, \quad (1)$$

其中， N_n 为靶区内产生的总中子数， N_μ 为穿过靶区的缪子总数， L_{avg} 为缪子在靶区中的平均径迹长度， ρ 为靶区介质密度。该定义能够消除几何尺寸的直接影响，便于不同模拟条件和实验结果之间进行比较 [4]-[6]。

3. 基于 TALYS 的中子产额修正方法

为构造对 Geant4 中子产额的修正模型，本文提取了 TALYS 1.8 在与 TENDL-2017 数据库一致条件下计算得到的 n 、 p 、 γ 与 ^{12}C 相互作用的非弹性截面数据 [10] [11]。考虑到 TALYS 主要适用于 200 MeV 以下能区，本文修正范围也限定在该能量区间内。

与 Geant4 中的核内级联模型相比，TALYS 给出的截面数据具有更充分的核反应理论依据，因此可作为 Geant4 中低能区关键反应通道的外部参考。本文并非将 TALYS 的全部末态信息直接

嵌入Geant4，而是仅提取与中子产额密切相关的非弹性反应道截面信息，用于后续的重赋权修正 [10] [11]。

3.1. 关键能区的截面偏差

对比TALYS与Geant4内置模型在200 MeV以下的反应截面可以发现，在几十至数百MeV的关键能区内，Geant4对 $n-^{12}\text{C}$ 和 $p-^{12}\text{C}$ 非弹性反应的预测通常与TALYS结果存在明显差异。对于 $\gamma-^{12}\text{C}$ 光核反应，Geant4中部分多体碎裂通道的处理也倾向于给出较强反应概率。这些差异的影响并不局限于单个反应顶点，而会通过后续级联过程积累，最终导致宏观中子产额出现系统性高估 [9]- [11]。

如图2所示，TALYS与Geant4在 n 、 p 和 γ 入射 ^{12}C 非弹性反应截面上存在明显差异。对于本文关注的中低能区，这种差异将直接影响相关反应顶点的发生概率，并进一步传递到中子产额的预测结果中。

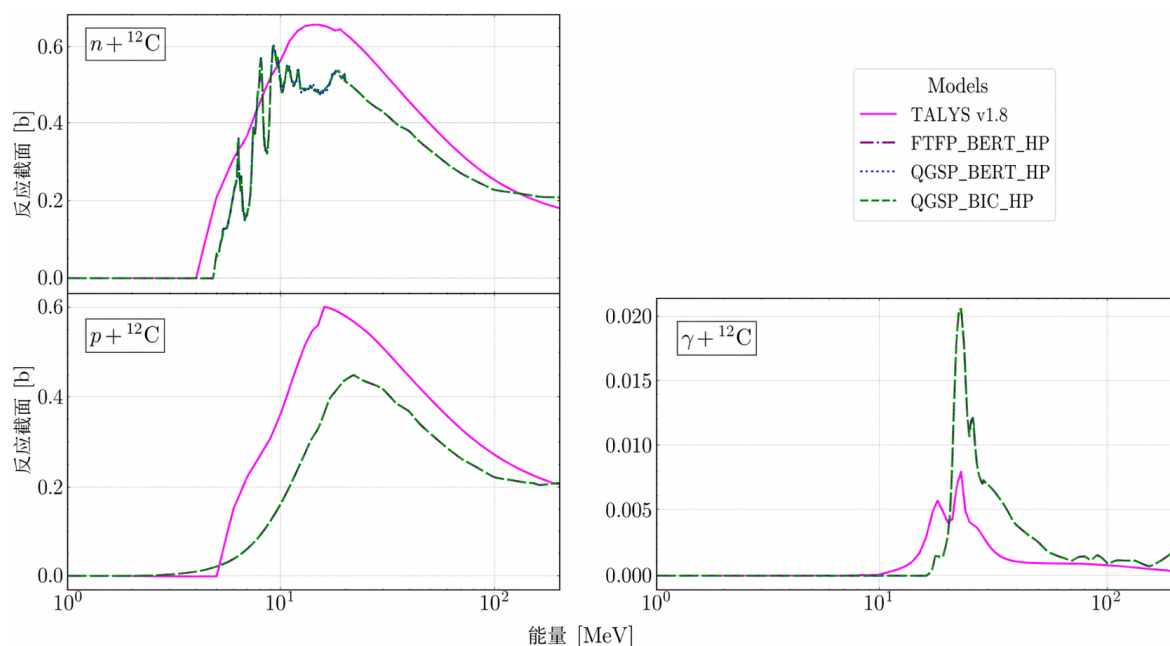


Figure 2. Comparison of inelastic reaction cross sections for n , p , and γ incident on ^{12}C between TALYS and Geant4

图 2. TALYS与Geant4对 n 、 p 和 γ 入射 ^{12}C 非弹性反应截面的比较

进一步，如图3所示，在若干与新中子产生直接相关的典型反应道上，TALYS与Geant4给出的截面结果差异更加明显。与总非弹性截面相比，这些关键反应道的差别更能解释不同模型下新中子产生强度以及最终中子产额的变化。

一种直接的修正思路是将Geant4内部使用的非弹性反应截面替换为TALYS截面，但这种做法在这类复杂级联模拟中难以直接采用。原因是Geant4中的反应截面、反应通道选择以及末态粒子的生成及其运动学分布是耦合在同一动力学框架内 [7]- [9]。若仅替换反应截面而不重新生成相应末态，可能破坏模型内部的一致性，并影响多级级联的统计特征。

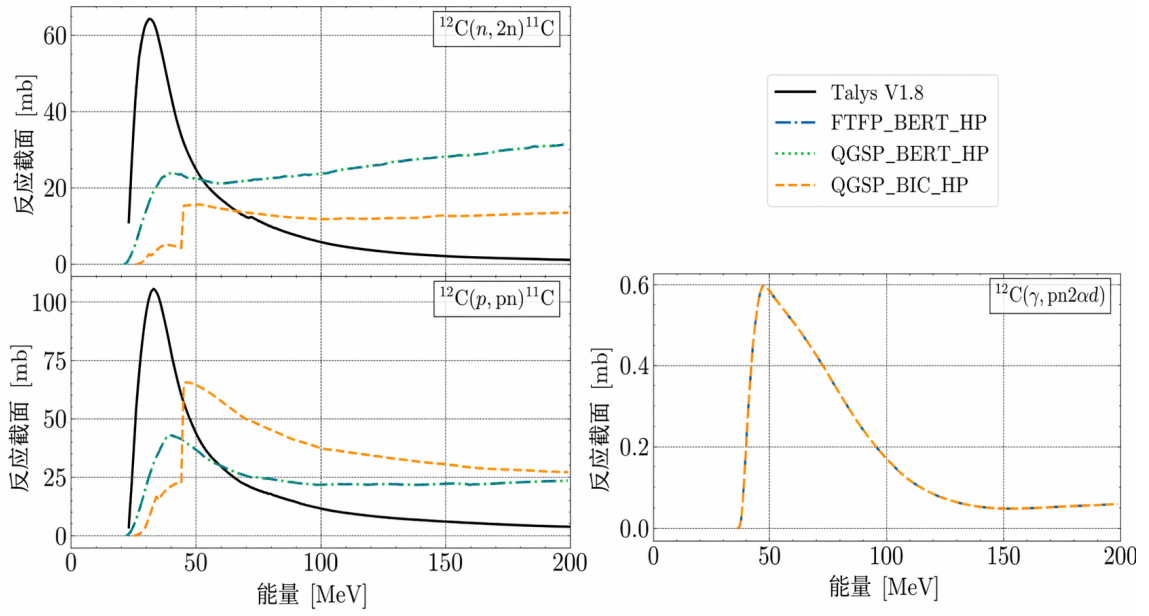


Figure 3. Comparison of reaction cross sections for major neutron-production channels between TALYS and Geant4

图 3. TALYS与Geant4对主要新中子产生道反应截面的比较

因此，本文不直接修改Geant4底层反应模型，而采用一种后处理式的统计修正方法：保留Geant4生成的级联结构与末态粒子运动学分布，只利用TALYS截面信息对关键反应顶点的中子贡献进行离线重赋权修正。

3.2. 逐顶点权重修正模型

对于任意一个缪子事例，定义修正后的总中子贡献为

$$N_n^{\text{corr}} = \sum_i N_i^{\text{G4}} W_i, \quad (2)$$

其中， i 遍历该事件中所有能够产生新中子的反应顶点， N_i^{G4} 表示Geant4在该顶点产生的末态中子数， W_i 为对应顶点的截面修正权重因子。若以入射母粒子种类 j 和碰撞能量 E_i 标记该顶点，则权重因子定义为

$$W_i \equiv W_{i,j}(E_i) = \begin{cases} \frac{\sigma_{\text{in},j}^{\text{TALYS}}(E_i)}{\sigma_{\text{in},j}^{\text{G4}}(E_i)}, & j \in \{n, p, \gamma\}, \text{ 靶核为 } ^{12}\text{C}, \\ & \text{且对应反应为新中子产生非弹性反应道}, \\ 1, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $\sigma_{\text{in},j}^{\text{G4}}$ 与 $\sigma_{\text{in},j}^{\text{TALYS}}$ 分别表示Geant4和TALYS对应的新中子产生非弹性反应道截面。该定义表明：对于每一个能够产生新中子的反应顶点，不直接替换Geant4的末态，而是仅利用TALYS与Geant4在

相应反应道和能量点上的截面比值，对该顶点的统计贡献重新加权。

这一修正并不是对单个事件末态进行重新抽样，而是对大量事件统计结果中的关键反应顶点实施逐顶点重赋权。因此，该方法在保持Geant4级联结构及末态粒子运动学分布不变的前提下，把TALYS对关键中子产生反应道的截面信息引入Geant4修正中 [9]- [11]。

3.3. 粒子种类和反应道的适用范围

上述修正模型具有以下边界条件：

1. **能量边界：** 当入射粒子动能高于200 MeV时，由于超出TALYS主要适用范围，权重取1，不对Geant4结果作修正；
2. **粒子与反应道边界：** 仅对 n 、 p 、 γ 入射 ^{12}C 时的新中子产生非弹性反应道进行修正，其余粒子、靶核及不产生新中子的反应过程均保持Geant4原始处理；此外，若某一由Geant4预测的新中子产生反应道在TALYS中不存在，则该反应道对应权重同样取1；
3. **运动学保持：** 修正只作用于反应顶点对中子产额的统计贡献，不改变Geant4生成的末态能谱、角分布和后续输运过程。

因此，该方法主要针对中子产额这样的积分量。对于更微分的观测量，如末态中子的精细能谱和空间分布，仅通过截面重赋权可能不足，仍需进一步研究。

4. 结果分析

4.1. TALYS修正对中子产额的影响及物理解释

根据Geant4原始模拟结果，采用不同强子物理列表时，中子产额均表现出一定程度的偏高趋势。引入TALYS截面信息后，两种物理列表对应的中子产额均出现系统性下降，表明中低能区关键反应通道的反应概率偏差确实是导致中子产额偏高的重要因素 [10] [11]。

从整体趋势上看，修正后的结果并不是对原始Geant4结果作统一比例缩放，而是说明修正结果与次级粒子的能量分布密切相关。由于次级 n 、 p 和 γ 射线在几十至数百MeV能区内的通量较为密集，该区间内截面的修正对最终中子产额贡献最为明显。

Geant4中子产额偏高，主要来自级联过程中若干关键反应通道在中低能区的反应概率偏大。当这些反应在单个顶点上被高估时，产生的次级中子会继续触发后续反应，使偏差在多级级联中逐步累积。TALYS给出的非弹性截面通常低于Geant4对应模型，因此通过权重因子降低这些顶点的贡献，可以有效降低新中子产生强度 [10] [11]。

从方法上看，这一结果表明中子产额偏差的修正并非必须整体替换Geant4模型。只要能够识别关键能区和关键反应通道，并利用更可靠的外部核反应截面对其贡献进行约束，即可在保持Geant4输运框架不变的前提下改善整体观测量的预测。

比较FTFP_BERT_HP与QGSP_BIC_HP两种物理列表可以发现，不同核内级联模型对中子产额的预测存在显著差异 [9]。BERT模型采用连续核物质近似，计算效率较高，但在多次碰撞和能

量共享处理上带有较强经验性。BIC模型则更强调核子之间的二体碰撞过程，对中低能区核反应动力学的描述通常更细致 [9]。

引入相同的TALYS截面修正策略后，BIC模型对应的结果整体上仍优于BERT模型。这说明中子产额的最终预测不仅依赖于关键截面本身，也与Geant4内部末态动力学模型有关。即TALYS修正能够改善Geant4对反应概率的描述，但不同核内级联模型自身的动力学特征仍会影响最终结果。

4.2. 与大亚湾中微子实验结果的比较

为检验本文方法在实际探测条件下的有效性，本节将修正结果与大亚湾反应堆中微子实验(Daya Bay)的中子产额测量结果进行比较 [6]。以1号实验大厅(Experimental Hall 1, EH1)探测器为例，其实验分析给出的中子产额为

$$Y_n^{\text{exp}} = (10.26 \pm 0.86) \times 10^{-5} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2. \quad (4)$$

在对应模拟中，缪子在靶区内的平均径迹长度取 $L_{\text{avg}} \approx 206.3 \text{ cm}$ 。表 1给出了Geant4原始结果与TALYS修正结果的比较。

Table 1. Comparison of neutron yields from original Geant4 simulation, TALYS-corrected simulation, and experimental measurement

表 1. Geant4原始模拟、TALYS修正模拟与实验测量中子产额比较

物理列表	原始产额 Y_n^{G4}	修正产额 Y_n^{corr}	原始偏差	修正偏差
FTFP_BERT_HP	12.31	10.88	+20.0%	+6.04%
QGSP_BIC_HP	11.88	10.22	+13.0%	-0.39%

注：产额单位均为 $\times 10^{-5} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$ 。

由表1可见，未经修正的Geant4 结果明显高估了中子产额。引入TALYS截面修正后，两种物理列表的结果均更接近实验值，其中FTFP_BERT_HP的偏差由+20.0%降低到+6.04%，QGSP_BIC_HP的偏差则由+13.0%缩小到-0.39%。结果说明，基于TALYS反应截面的离线重赋权方法能够有效改善Geant4在LS中中子产额的预测精度；同时表明，在相同修正策略下，基于BIC级联模型的结果与实验符合更好 [6]。

5. 结论与展望

本文围绕Geant4在LS中中子产额预测存在的系统偏差问题，提出了一种基于TALYS反应截面的离线逐顶点重赋权修正方法。该方法在不改变Geant4级联结构和末态粒子运动学分布的前提下，利用TALYS提供的 n 、 p 、 γ 与 ^{12}C 作用时新中子产生非弹性反应道截面数据，对中低能区关键反应顶点的中子贡献进行了统计上的修正。

结果表明，中低能区强子-核非弹性反应截面的模型偏差是影响中子产额的重要因素。引入TALYS反应截面后，Geant4的中子产额预测整体上得到改善，不同物理列表下的偏差均有所减

小, 其中基于BIC级联模型的结果与实验符合更好。本文说明, 对于中子产额这类物理量, 利用外部核反应数据对关键反应通道进行重赋权, 为蒙特卡罗模拟精度提供了可行途径。

本文仍有进一步拓展空间。首先, 当前方法主要针对 ^{12}C 靶核与中低能区 n 、 p 、 γ 反应, 对其他介质成分和更高能区的修正尚未展开。其次, 本文主要讨论中子产额这一积分量, 对末态中子的能谱、角分布和空间分布等更微分观测量, 还需要在未来工作中结合更细致的核反应截面进行研究。

6. 基金项目

本研究得到国家自然科学基金(项目编号: 12405125、12575210)、国家重点研发计划(项目编号: 2024YFE0110500)的支持。

参考文献

- [1] Wang, Y.F., Balic, V., Gratta, G., Fassò, A., Roesler, S. and Ferrari, A. (2001) Predicting Neutron Production from Cosmic-Ray Muons. *Physical Review D*, **64**, Article ID: 013012. <https://doi.org/10.1103/physrevd.64.013012>
- [2] Kudryavtsev, V.A., Spooner, N.J.C. and McMillan, J.E. (2003) Simulations of Muon-Induced Neutron Flux at Large Depths Underground. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **505**, 688-698. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)00983-5](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)00983-5)
- [3] JUNO Collaboration (2022) JUNO Physics and Detector. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **123**, Article ID: 103927. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2021.103927>
- [4] Abe, S., *et al.* (2010) Production of Radioactive Isotopes through Cosmic Muon Spallation in KamLAND. *Physical Review C*, **81**, Article ID: 025807.
- [5] Bellini, G., *et al.* (2013) Cosmogenic Backgrounds in Borexino at 3800 m Water-Equivalent Depth. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **8**, Article ID: 49.
- [6] An, F.P., *et al.* (2018) Cosmogenic Neutron Production at Daya Bay. *Physical Review D*, **97**, Article ID: 052009.
- [7] Agostinelli, S., *et al.* (2003) GEANT4—A Simulation Toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **506**, 250-303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [8] Allison, J., *et al.* (2016) Recent Developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **835**, 186-225. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
- [9] GEANT4 Collaboration (2024) GEANT4 Physics List Guide (Release 11.2). CERN.

- [10] Koning, A., Hilaire, S. and Goriely, S. (2023) TALYS: Modeling of Nuclear Reactions. *The European Physical Journal A*, **59**, Article No. 131.
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-01034-3>
- [11] Koning, A.J., Rochman, D., *et al.* (2017) TENDL-2017. TALYS-Based Evaluated Nuclear Data Library.