

锦屏深地核天体物理实验室屏蔽计算

张环宇¹, 连钢¹, 刘萍¹, 任杰¹, 阮锡超¹, 武启², 唐晓东²

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 锦屏深地核天体物理实验室(JUNA)为核天体物理关键反应的研究提供了极低本底环境,加之400 kV 强流高稳定加速器的使用,使核天体物理感兴趣能区(伽莫夫窗口)的直接测量成为可能。而同时为避免加速器产生本底破坏锦屏深地实验室的超低本底环境,需估算加速器运行本底,进而对核天体物理实验室进行整体屏蔽。以屏蔽系统的初步设计方案为基础,基于中国核数据中心推荐的综合评价核数据库 CENDL-NP,采用 MCNP 方法对其进行了模拟计算。计算过程采取了权重窗技巧与改变几何条件相结合等方法来减小方差,以提高 MCNP 方法在计算深穿透问题时的准确性。计算结果表明,该实验室的屏蔽系统对加速器引起的本底进行了有效的屏蔽。

关键词: 锦屏深地核天体物理实验室; MCNP; 屏蔽计算; 中子深穿透问题; CENDL-NP

中图分类号: O571.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2018)07-1181-05

doi: 10. 7538/yzk. 2018. 52. 07. 1181

Shielding Calculation of Jinping Underground Laboratory for Nuclear Astrophysics

ZHANG Huanyu¹, LIAN Gang¹, LIU Ping¹, REN Jie¹,

RUAN Xichao¹, WU Qi², TANG Xiaodong²

(1. *Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

2. *Institute of Modern Physics, China Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Jinping Underground Laboratory for Nuclear Astrophysics provides ultra-low background environment for the study of nuclear astrophysics critical reaction. In addition, the use of 400 kV high current and high stability accelerator makes the direct measurement of the interested energy zone in nuclear astrophysics (Gamow window) possible. In order to avoid the damage caused by the background of accelerator to the laboratory's ultra-low background, it's necessary to estimate the background of the accelerator and establish the overall shielding system formal. The preliminary design of shielding system was simulated by MCNP method based on the comprehensive evaluation nuclear database CENDL-NP recommended by China Nuclear Data Center. In order to improve the precision of MCNP method in computing deep neutron penetration prob-

lem, weight window technique and changing geometric condition were used to reduce the variance. The results of calculation show that the shielding system of the laboratory effectively reduces the background caused by the accelerator.

Key words: Jinping Underground Laboratory for Nuclear Astrophysics; MCNP; shielding calculation; neutron deep penetration problem; CENDL-NP

核天体物理是核物理与天体物理融合形成的交叉学科^[1],随着深地科学的日益发展^[2],利用深地实验室开展关键核反应的精确测量已成为国际公认的核天体物理前沿方向之一。锦屏深地核天体物理实验室(JUNA)是目前世界上最深的地下实验室,借助锦屏深地实验室超低本底优势,将建设我国首个深地核天体物理实验平台^[3],为后续开展系列核天体关键反应研究打基础。锦屏深地实验室宇宙线本底^[4]较LUNA^[5]的低100倍,核天体物理实验平台束流强度较LUNA的高10倍以上,有条件完成LUNA及其他实验室无法完成的核天体物理关键反应的精确测量,取得原创性成果,使我国的实验核天体物理研究跻身国际领先行列。

借助锦屏深地实验室的超低本底环境,使用强流高稳定性加速器装置,大幅提高了实验测量中的效应本底比,使众多核天体物理关键反应的直接测量得以实现。但同时必须对高强度束流引起的本底做好屏蔽,充分发挥锦屏深地实验室的本底优势。除提高束流传输效率可有效降低强流加速器装置引起的本底外,还需建立被动屏蔽系统,进一步减小束流引入的本底,提高实验测量的灵敏度。同时,为避免对锦屏深地实验室其他超低本底实验造成的影响,需对核天体物理共用实验平台进行整体屏蔽。

本文将采用MCNP方法对锦屏深地核天体物理实验共用平台的整体屏蔽结构初步设计方案进行屏蔽计算,对加速装置引入本底的屏蔽效果进行评估。

1 实验室整体屏蔽

锦屏深地核天体物理实验室中,本底主要来自靶室泄漏次级粒子以及强流加速装置引入的本底。实验室整体屏蔽系统的设计是根据初步模拟计算完成的,设计方案为:对加速管进行1 cm厚的铅屏蔽,并在距加速平台20 m的位置建立混凝土屏蔽墙(密度 2.35 g/cm^3)。屏

蔽墙结构分3个部分:最下层部分高3 m,由50 cm厚的混凝土材料构成;中间部分高3 m,由25 cm厚的混凝土材料构成;最上层部分为最大高度6 m、厚5 cm的聚乙烯材料,屏蔽墙总高12 m。在距离实验室左侧墙壁2 m处放置屏蔽门,由0.5 cm铁皮包裹20 cm厚聚乙烯和4 cm厚的铅材料组成。实验室全长50 m,外墙为混凝土材料,厚度为20 cm,实验室大门位于外墙中心,宽6 m、高4 m、厚25 cm,由1 cm铁板包裹中空。图1为JUNA的混凝土屏蔽示意图。

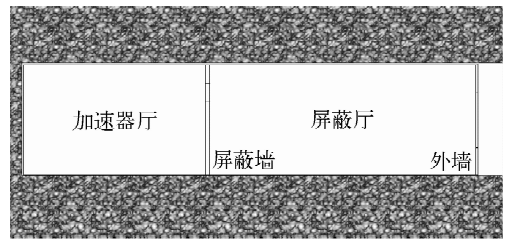


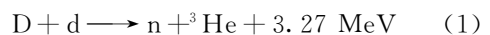
图1 JUNA 混凝土屏蔽示意图

Fig. 1 Concrete shielding system of JUNA

经过对靶室泄漏粒子的MC模拟计算发现,通过该套屏蔽系统的屏蔽,核天体物理实验室泄漏本底的最大值为 $6.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,对锦屏深地实验室其他超低本底实验造成的影响可忽略不计,证明现有的屏蔽系统设计是满足设计需求的。

2 加速装置引入本底估算

强流加速装置引入的本底主要出现在低能传输段的偏转磁铁弯道处,质子束流中的 D^+ 杂质在此处产生沉积(图2),与束流中的 D^+ 发生反应产生中子。



根据鲁尔大学关于氘在不同材料中电子屏蔽效应的研究结果^[6],注入量 Q 在 1 C/cm^2 左右, D 含量达平衡,反应产额达最大。当加速器

运行一段时间后,沉积 D 趋于饱和,相当于 1 个均匀分布的椭圆形 D 靶,靶原子数由式(2)计算得到:

$$N = Q/e = 6.24 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \quad (2)$$

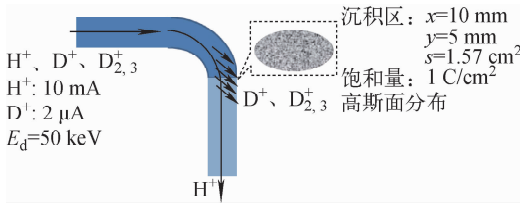


图 2 加速管弯道处的 D⁺ 沉积示意图

Fig. 2 Deposition of deuterium at elbow of accelerator tube

此时,高斯分布的 D 束打到沉积区域产生的中子仍是高斯分布。入射 D⁺ 粒子数可由式(3)得到:

$$N = 2 \mu\text{A}/e = 1.25 \times 10^{13} \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

从 D(d,n)³He 的微分截面和出射中子能量(表 1^[7])看,不同角度的出射中子数量和能量变化均不太大,因此在模拟计算时可将中子源简化为一能量为 2.637 MeV 的单能中子源,角分布为各向同性。根据在中国科学院近代物理研究所离子源平台用 D⁺ 束流进行的实验研究,质子束流强 10 mA 时,4π 空间的中子产额上限为 50 s⁻¹。

3 计算方法

3.1 减小方差措施

虽然对计算对象进行了几何简化,整体结构不复杂,但由于空间范围大,属于典型的深穿透问题。采用 MCNP 方法解决深穿透屏蔽问题时,结果通常会难以收敛,存在较大误差,由于粒子空间位置抽样引起的统计涨落较大,当屏蔽介质的厚度超过一定范围后,其计算结果通常较实际情况低得多。因此本次计算采用一系列措施减小计算结果方差。

1) 权重窗优化

将屏蔽墙等重要区域和非重要区域的物理过程分开计算,提高重要区域的计数率。对屏蔽介质进行分层计算,利用 MCNP 程序中权重窗可自我优化的特点,通过逐次改变屏蔽体参数,得到各栅元适当的权重窗系数。每次的权

重窗系数由以下方法得出:保持源项不变,减小屏蔽介质的密度和厚度,设置合适的权重窗得出可靠的计算结果,并利用权重窗生成器卡生成更优的权重窗系数,用生成的权重窗系数替代原有权重窗,经若干迭代运算,逐渐加大屏蔽介质的密度和厚度到真实值^[8]。

表 1 D(d,n)³He 微分截面和出射中子能量(E_d=50 keV)

Table 1 Differential cross section and neutron energy of D(d,n)³He (E_d=50 keV)

角度/(°)	微分截面/(mb · sr ⁻¹)	E _n /MeV
0	0.573	2.722
10	0.565	2.718
20	0.542	2.706
30	0.504	2.686
40	0.461	2.659
50	0.416	2.626
60	0.376	2.589
70	0.344	2.548
80	0.324	2.505
90	0.315	2.461
100	0.319	2.418
110	0.333	2.378
120	0.354	2.34
130	0.38	2.307
140	0.407	2.278
150	0.431	2.255
160	0.451	2.239
170	0.464	2.228
180	0.468	2.225

2) 强迫碰撞

对每个重要栅元设置碰撞几率,增加各栅元内粒子的抽样数,从而减小统计涨落、降低方差。

3) 增加统计次数

本次屏蔽计算中,为减小计算的方差,在考虑计算时间成本的条件下,将 NPS 值即源粒子数设置为 5×10⁸。经计算,结果的相对误差在 5% 以内,符合计算要求。

3.2 计算条件

计算在中国核数据中心高性能计算集群上

进行,使用 MCNP5 程序,计算使用的 ACE 格式连续能量点截面库是以中国核数据中心推荐的混合库——核动力设计用中子评价数据库(CENDL-NP)为基础,经过核数据处理程序 NJOY99(CNDC 本地修正版)加工而成。经过 1 245 个临界及屏蔽装置的基准检验以及与其他数据库及实验数据的对比分析,该库在大量基准装置上的整体表现优于 ENDF/B-VII.1 库及 JENDL-4.0 库^[9]。

4 计算结果

屏蔽墙内不同厚度的平均中子通量密度计算结果如图 3 所示。

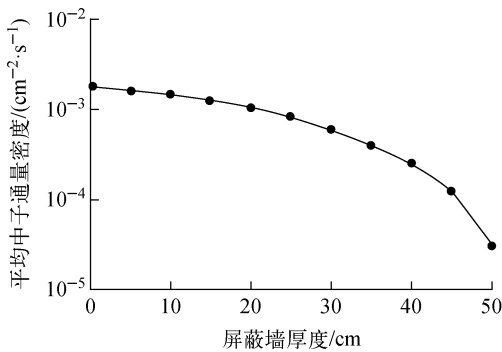


图 3 屏蔽墙内的中子通量密度衰减

Fig. 3 Attenuation of average neutron flux density in shielding wall

由图 3 可看到,经过混凝土材料对中子的屏蔽,屏蔽墙可使由加速装置产生的本底降低约两个数量级。屏蔽门内的中子通量密度衰减情况如图 4 所示。

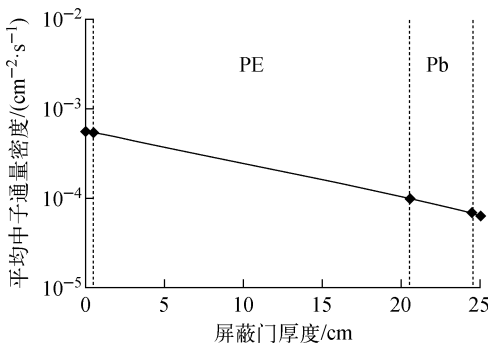


图 4 屏蔽门内的中子通量密度衰减

Fig. 4 Attenuation of average neutron flux density in shielding door

由图 4 可看到,屏蔽门可使中子通量密度降低约 1 个量级。

模拟计算在实验室外墙及大门外选取了不同位置放置探测器来记录核天体物理实验室中泄漏出的本底水平,探测器位置如图 5 所示,其中 B、E 点横坐标位置与偏转磁铁弯道位置垂直。

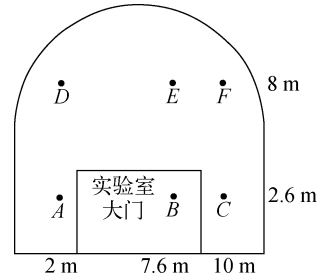


图 5 实验室外侧放置探测器的位置

Fig. 5 Location of detectors outside laboratory

计算得到的实验室外墙的中子通量密度水平列于表 2。

表 2 核天体物理实验室外墙各位置的平均中子通量密度

Table 2 Average neutron flux density of different positions outside laboratory

位置	平均中子通量密度/(cm ⁻² ·s ⁻¹)
A	7.68 × 10 ⁻¹⁰
B	5.03 × 10 ⁻⁹
C	3.39 × 10 ⁻⁹
D	1.28 × 10 ⁻⁹
E	7.18 × 10 ⁻⁹
F	7.94 × 10 ⁻¹⁰

由加速装置引入的本底最高值出现在 E 点,即拱洞上方中间位置,平均中子通量密度为 7.18 × 10⁻⁹ cm⁻²·s⁻¹,与靶室泄漏本底叠加后的平均中子通量密度为 6.67 × 10⁻⁷ cm⁻²·s⁻¹,小于锦屏深地实验室中的平均中子本底水平(~10⁻⁶ cm⁻²·s⁻¹)^[10]。

5 结论

针对低能强流高稳定性加速装置在偏转磁铁弯道处的泄漏中子,本文对锦屏深地核天体物理实验室现有的整体屏蔽设计进行了屏蔽计

算。计算结果反映出了屏蔽系统各组成部分对加速装置引入本底的屏蔽效果。结果表明,该设计方案对加速装置偏转磁铁弯道处的泄漏中子起到了很好的屏蔽作用,对加速装置产生的中子本底进行了有效隔离,避免了对锦屏深地实验室其他超低本底实验的影响,达到相关设计要求。就对其他超低本底实验室的影响而言,无需在偏转磁铁弯道处增加局部屏蔽。该屏蔽计算为进一步开展核天体物理共用实验平台的工程设计提供了依据,同时也证明了CENDL-NP库在实际工程中的应用价值。

参考文献:

- [1] ROLFS C E, RODNEY W S. *Cauldrons in the Cosmos*[R]. Chicago: The University Chicago Press, 1988.
- [2] 陈和生. 深地科学和技术实验的发展及战略思考[J]. 科学, 2010, 62: 4-7.
CHEN Hesheng. Thinking on the development and strategy of deep science and technology experiment[J]. Science, 2010, 62: 4-7.
- [3] LIU Weiping. Progress of Jinping Underground Laboratory for Nuclear Astrophysics (JUNA) [J]. Sci China Phys Mech Astron January, 2015, 58: 1-7.
- [4] WU Yucheng. Measurement of cosmic ray flux in the China Jinping underground laboratory [J]. Chinese Physics C, 2013, 37(8): 086001.
- [5] COSTANTINI H. LUNA: A laboratory for underground nuclear astrophysics[J]. Rep Prog Phys, 2009(72): 086301.
- [6] YANG Pingshen. Measurement of γ detector backgrounds in the energy range of 3-8 MeV at Jinping underground laboratory for nuclear astrophysics[J]. Sci China Phys Mech Astron, 2017, 60: 102022.
- [7] 马鸿昌. 加速器单能中子源常用数据手册[M]. 北京:原子能出版社,1976.
- [8] 韩毅,沈华亚,陈法国. 一种基于 MCNP 程序的深穿透问题处理方法[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34: 1 482-1 486.
HAN Yi, SHEN Huaya, CHEN Faguo. A processing method for deep penetration problem based on MCNP program[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2014, 34: 1 482-1 486.
- [9] 吴海成,覃英参,张环宇,等. CENDL-NP 热谱临界基准检验[J]. 核动力工程, 2014(S2): 176-178.
WU Haicheng, QIN Yingcan, ZHANG Huan-yu, et al. Critical benchmarking test for the thermal spectrum[J]. Nuclear Power Engineering, 2014(S2): 176-178.
- [10] ZENG Z M, GONG H, YUE Q, et al. Thermal neutron background measurement in CJPL[J]. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A, 2015, 804: 108-112.