

掺钆液闪探测器用于锦屏地下实验室的快中子本底测量

王 桢¹, 何汉涛², 刘书魁³, 林兴德³, 幸浩洋³, 朱敬军¹
(1. 四川大学原子核科学技术研究所 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064;
2. 中国原子能院, 北京 102413; 3. 四川大学物理学院, 成都 610064)

摘 要: 文章采用掺杂 0.5% Gd 液闪探测器测量了中国锦屏地下实验室(CJPL)的快中子本底通量及中子能谱. 掺钆液闪探测器对于核反冲信号和电子反冲信号优异的甄别性能用于中子候选事例的筛选, 并采用钆对热中子的俘获特性进行时间甄别. 对有效采数时间为 206 d 的数据进行分析, 获得锦屏地下实验室的聚乙烯室(PE)内 1~10 MeV 快中子通量为 $4.45 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 采用相似的方式分析了掺钆液闪探测器(Gd-Ls)中天然放射系的 α 本底程度, 来源于 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 的 α 粒子含量分别为 $(0.0227 \pm 0.0001) \text{ s}^{-1}$, $(0.0329 \pm 0.0001) \text{ s}^{-1}$ 和 $(0.1471 \pm 0.0002) \text{ s}^{-1}$. 与世界上其他深地实验室的快中子通量进行对比, CJPL 的快中子通量处于极低水平, 是进行稀有事例测量实验的理想场所.

关键词: CJPL; 暗物质; 快中子; 粒子甄别; α 本底; 掺钆液闪探测器

中图分类号: TL812.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.044004

Fast neutron background measurement at the China Jinping laboratory with a gadolinium-doped liquid scintillator detector

WANG Zhen¹, HE Han-Tao², LIU Shu-Kui³, LIN Xing-De³, XING Hao-Yang³, ZHU Jing-Jun¹
(1. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of the Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 3. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

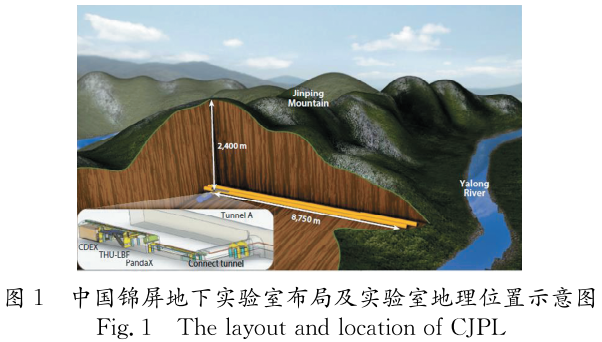
Abstract: We report the fast neutron flux and spectrum in the PE room at the China Jinping Underground Laboratory (CJPL) with a liquid scintillator detector doped with 0.5% gadolinium (Gd-Ls). The difference between nuclear recoil signals and electronic recoil signals is used to select neutron events in a liquid scintillator detector doped with gadolinium. The signature of gadolinium-captured thermal neutrons is used to time discrimination. The fast neutron flux range of 1~10 MeV measured in the PE room at the CJPL is $4.45 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ based on 206 days of data. A similar selection method is used to analyze the degree of α contamination in the Gd-Ls. The α contamination of the natural radioactivity series including ^{238}U , ^{235}U , and ^{232}Th are $(0.0227 \pm 0.0001) \text{ s}^{-1}$, $(0.0329 \pm 0.0001) \text{ s}^{-1}$, and $(0.1471 \pm 0.0002) \text{ s}^{-1}$, respectively. Compared with the fast neutron flux of other deep laboratories around the world, the fast neutron flux of CJPL is at an extremely low level, which is an ideal place for rare-events measurement experiments.

Keywords: CJPL; Dark matter; Fast neutron; Particle discrimination; α contamination; Gd-Ls

收稿日期: 2020-04-20
基金项目: 国家自然科学基金(11275134); 清华大学粒子技术与辐射成像教育部重点实验室项目(20151202)
作者简介: 王桢(1996-), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为辐射物理与医学物理. E-mail: wangzhenscu@stu.scu.edu.cn
通讯作者: 朱敬军. E-mail: zhujingjun@scu.edu.cn

1 引 言

无中微子双 β 衰变^[1]、中微子振荡^[2]、暗物质探测^[3]等稀有事例的探测对于环境本底有着苛刻的要求,多数课题组选择深地实验室作为理想实验场所. 对于深地稀有事例探测,中子是环境本底的重要来源之一,影响着实验的精确程度,数千米的岩石层可有效减少宇宙射线通量以及宇生中子量. 然而,受 (α,n) 反应及 ^{238}U 自发裂变的影响,实验选用材料、岩石、混凝土、支撑结构等会产生大量的中子,这将导致实验误差. 中子对于实验本底的贡献主要取决于地下实验室的深度,宇宙射线在浅层地下实验室中处于主导地位. 中国锦屏地下实验室(CJPL)^[4]的岩石层厚度达到 2 400 m,等效水深 6 700 m,是目前世界上最深的地下实验室. CJPL 位于中国四川锦屏县. 中国暗物质实验课题组(CDEX)致力于采用高纯锗探测器(PPCGe)用于弱相互作用重粒子(WIMPs)的直接探测. CDEX 合作组现已搭建一个聚乙烯室用于放置 CDEX-1A,CDEX-1B 和 CDEX-10 探测器. 图 1 展示了中国锦屏地下实验室的位置.



中国锦屏地下实验室大厅的热中子通量已通过 ^3He 正比计数器测量^[5],热中子通量为 $(4.00 \pm 0.08) \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,采用邦纳多球中子谱仪测量了大厅内 20 MeV 以下的中子通量^[6]. 能区 1~10 MeV 的中子通量受探测器响应以及解谱的限制尚未测量. 本文采用掺杂 0.5% Gd 的液体闪烁体探测器测量了 CJPL 聚乙烯室的快中子能区通量. 文章实验搭建部分介绍了聚乙烯室内探测器整体结构及数据采集系统(DAQ). 借助于 Geant4 模拟,探测器响应部分介绍了能量刻度及探测器效率. 数据处理部分介绍了中子反冲谱的获取及解谱方法,并计算了液体闪烁体内 α 本底计数率. 本文最后一部分分析了实验结果并对此提出合理解释.

2 实验搭建

掺钆液闪(Gd-Ls)中子探测器用于中子及中微子实验已有数十年历史. 借助于 Gd-Ls,Boulby 地下实验室测量了中子能谱及中子通量^[7]. 致力于中微子混合角 θ_{13} 测量的大亚湾课题组^[8],RE-NO 课题组^[9]都在实验中采用 Gd-Ls. 与传统液体闪烁体相比,掺钆液闪中子探测器的特性在于优良的中子与 α 粒子的甄别能力. 快中子与原子核的多次弹性散射会产生大量的反冲核,这些反冲核被 DAQ 以快信号的形式所采集. 大约 7 μs 后,慢化后形成的热中子被钆所俘获,反应放出一组高能 γ 射线($E > 8 \text{ MeV}$),这一信号以慢信号被数据采集系统记录. 信号的快慢符合用于从本底中筛选中子,尤其是 α 粒子.

直径 30 cm,长 40 cm 的圆柱形掺钆液闪中子探测器容积为 28 L,灌装有 0.5% Gd 的 EJ-335 有机闪烁体. 圆柱上预留了小口用于灌装液闪及防止漏液,石英玻璃容器两端连接滨松 R5912-02 光电倍增管,外层缠绕一层聚四氟乙烯用以增加光的反射,提高光收集率,采用无氧铜作为支撑结构. 探测器放置在聚乙烯实验室的角落,如图 2(b)所示. 支撑结构上预留小孔用于能量刻度实验. 图 2 展示了探测器构造和模拟设计.

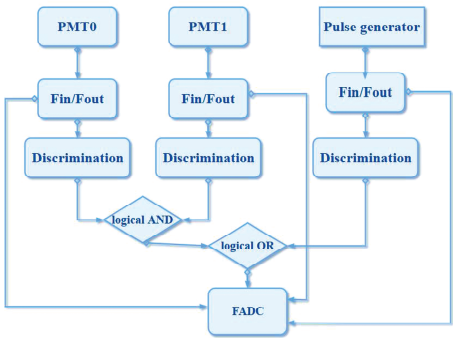
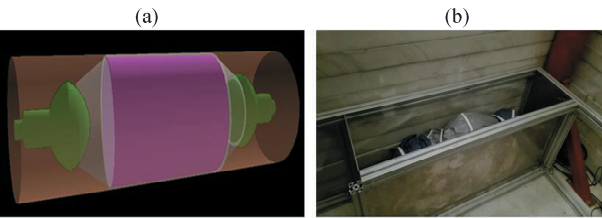


图 3 数据采集系统

Fig. 3 The design of DAQ

图 3 显示了数据获取系统(DAQ)的流程. 来自于两端光电倍增管的信号与函数发生器信号经扇入扇出后, 经过阈值甄别插件进行逻辑与, 函数发生器用于记录死时间段的脉冲信号, 经快速模数转换插件后由采数电脑收集分析.

3 探测器响应

3.1 能量刻度

^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源依次用于能量刻度实验中. 放射源通过探测器顶端预留的小孔悬挂在液闪的中心位置, 距离铅室小口 30 cm 处. 图 2(a) 显示了用于 Geant4 模拟的探测器整体构造. 对于双端

液闪探测器, 信号可定义为一个与位置无关的量.

$$E=a\cdot\sqrt{Q_{p0}\cdot Q_{p1}} \tag{1}$$

公式中, E 表示能量, a 为常量, Q 值表示脉冲波形谱的剔除基线后的积分结果, 0, 1 分别代表两端不同的光电倍增管. 与试验不同的是, 模拟结果中缺少能量分辨率, 因而模拟结果用一高斯函数做展宽处理. 高斯展宽量 σ 可有下式导出

$$\frac{\sigma}{E}=\sqrt{\alpha+\frac{\beta}{E}} \tag{2}$$

该式中, 两个参数 α 与 β 分别取 0.001, 0.003 5 MeV. 脉冲波形谱的峰值位置作为能量刻度点.

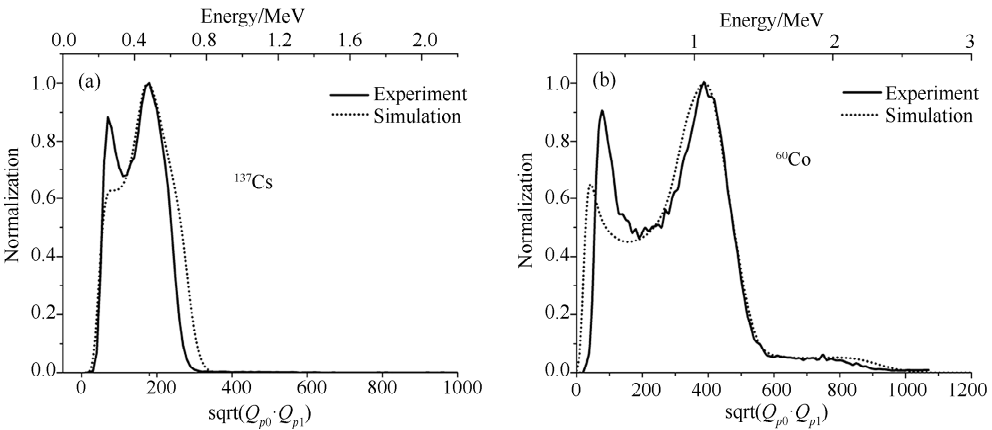


图 4 Gd-Ls 的能量刻度: 刻度函数为 $Q=353.33E+11.94$
Fig. 4 Calibration of Gd-Ls; the result of calibration is $Q=353.33E+11.94$

3.2 中子源的探测效率

Gd-Ls 对不同能量的单能中子探测效率受能量影响, 依据解谱区间, 选取 1~10 MeV 能区内的单能中子用于模拟. 单能中子源定义为将探测器完全包裹的面源, 采用与实验相同的数据分析流程, 如能量筛选, 波形筛选等条件, 具体筛选流程参照 4.1 小节. 图 5 显示了探测器对不同单能中子的探测效率.

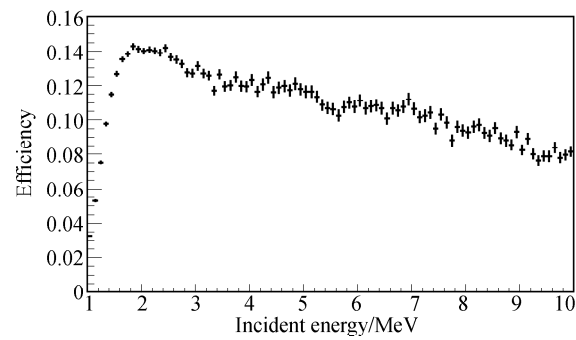


图 5 Gd-Ls 的单能中子探测效率
Fig. 5 Efficiency of Gd-Ls detector of monoenergetic neutrons

3.3 快中子能谱重建

中子作为不带电的中性粒子, 在液闪探测器中能量主要以弹性碰撞损失. 反冲核在液体闪烁体中沉积能量并发出荧光, 通常实验获得的为核反冲谱数据. 中子能谱的重建即从核反冲能谱反推入射中子能谱, 中子能谱与核反冲能谱的关系可由下式导出,

$$N_k=\int_0^{\infty}R_k(E)\varphi(E)dE \tag{3}$$

公式中 N_k 表示实验反冲谱中第 k 个区间内计数, $R_k(E)$ 为第 k 种入射单能中子的响应矩阵, $\varphi(E)$ 为中子通量, 基于多道迭代算法的 GRAVEL 应用于解谱.

$$\Phi_i^{j+1}=\Phi_i^j\exp\left[\frac{\sum_{k=1}^KW_{ik}^j\ln(U_k^j)}{\sum_{k=1}^KW_{ik}^j}\right], \tag{4}$$

$j=0,1,2,\cdots,J$

$$W_{jk}^i = \frac{R_{ki} \Phi_i^j}{\sum_{i=1}^I R_{ki} \Phi_i^j} \frac{N_k^2}{\sigma_k^2}$$
$$U_k^j = \frac{N_k}{\sum_{i=1}^I R_{ki} \Phi_i^j \Delta E_i}$$

式中, K 表示反冲谱的总区间数, J 为迭代次数, ΔE_i 为该能区宽度, Φ_i^0 为具有能谱先验信息的初始反冲谱. GRAVEL 算法的优势之处在于解谱结果与初始能谱的模糊化, 这使得求解地下实验室的未知能谱成为可能.

4 数据处理

4.1 核反冲谱

液体闪烁体内的核反冲信号与电子反冲信号在下降沿有明显的差异, 如图 6 所示, 带电粒子的波形差异可用于区分两种信号, 甄别因子 DisFactor 被定义为下式.

$$\text{DisFactor} = \frac{Q_{\text{tail}0} + Q_{\text{tail}1}}{Q_{\text{total}0} + Q_{\text{total}1}} \tag{5}$$

式中, Q_{tail} 为时间区间 70~200 ns 的积分面积, Q_{total} 为整个脉冲波形的积分面积, 0, 1 分别代表不同的光电倍增管信号. 通常, 包括中子及 α 粒子的核反冲信号的甄别因子大于电子反冲信号甄别因子.

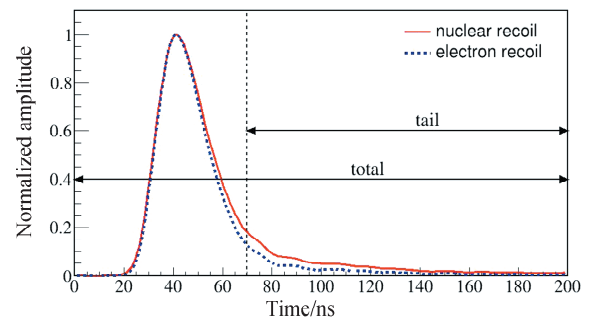


图 6 核反冲信号与电子反冲信号的差异
Fig. 6 Difference between nuclear recoil signals and electron recoil singals

本底数据中筛选核反冲信号的过程如下:

(1) 延迟信号筛选: 在掺钆液体闪烁体中, 快中子经弹性散射慢化后形成热中子, 钆元素对热中子有较大俘获截面, 热中子在俘获过程中伴随高能 γ 射线. 能量筛选的下阈为 3 MeV, 剔除了环境中的 γ 本底, 尤其是 ^{208}Tl 释放的 2.6 MeV γ 射线. 甄别因子上阈为 0.12, 以此抑制能量高于 3 MeV 的中子形成的核反冲信号. 双高斯函数用于计算此次筛选效率.

(2) 快信号筛选: 图 8 显示了瞬时-延迟信号

的时间间隔, 时间窗 $[2, 40] \mu\text{s}$ 用以扣除残留的偶然符合事例但保留候选中子事例. 掺钆液闪中子探测器的阈值为 0.23 MeV_{ee}, 等效入射中子能量 1 MeV 时的沉积能量. 甄别因子与时间间隔筛选的结果如图 9 所示.

(3) 残留电子反冲事例的扣除: 候选中子事例以区间 0.1 MeV_{ee} 切片, 双高斯函数用于拟合候选中子事例中的, 选取较大甄别因子的高斯峰面积表示中子事例, 拟合过程如图 10 所示.

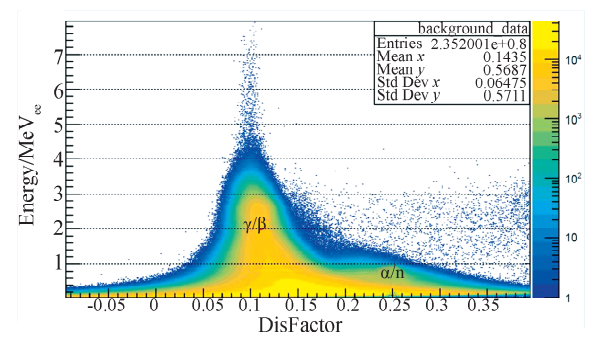


图 7 甄别因子与能量的关系
Fig. 7 The relationship of DisFactor and energy

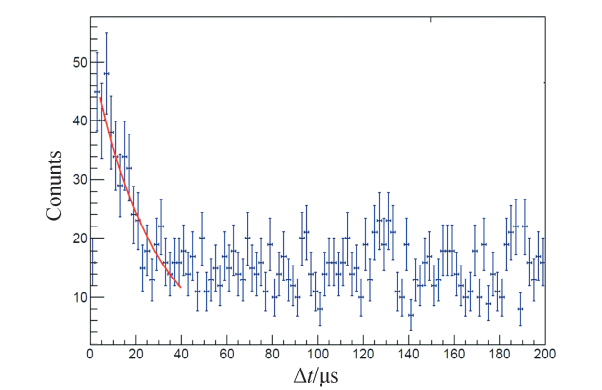


图 8 时间间隔分布
Fig. 8 The distribution of time interval

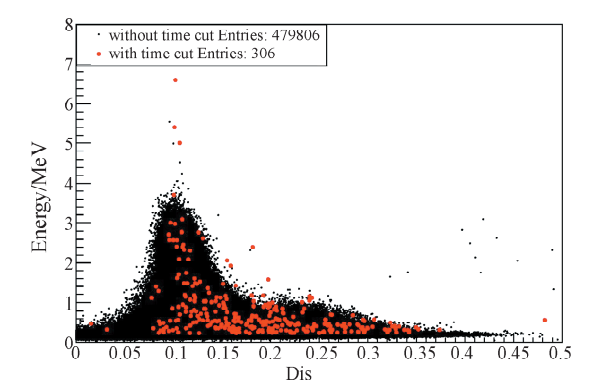


图 9 时间筛选结果
Fig. 9 The results of time discrimination

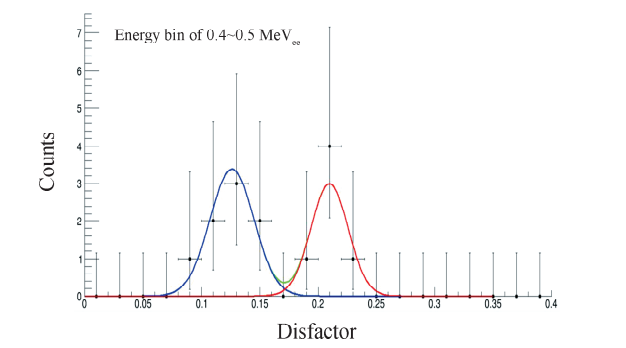
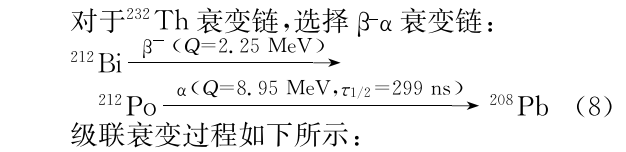
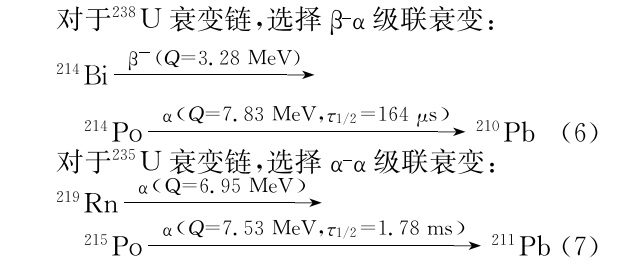


图 10 双高斯拟合获取中子事例
Fig. 10 Double Gaussian fit for neutron events

4.2 偶然符合 α 本底

所有材料都会含有一定量的 U/Th 杂质, 其中²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th 会发生级联衰变, 包括多级 α 衰变和 β 衰变, 因此液体闪烁体中会少量的 α 和 β 粒子. 通过选取时间间隔较短的级联衰变链, 使得更容易通过时间间隔筛选粒子, 依次选取以下 3 条级联衰变链^[10].



(1) 能量筛选: 图 11 展示了通过高斯拟合后实验测得 α 粒子能量, 高斯拟合区间 α 测量能量的高斯平均值±σ 之内筛选效率为 68.26%. 对于电子事例, 能谱为连续谱, 要求其阈值下限为 0.23 MeV. 对于²¹⁴Bi 与²¹²Bi 粒子, 能量筛选上限分别为 3.5 和 2.4 MeV_{ee}, 筛选效率为 100%.

(2) 甄别因子筛选: 基于液体闪烁体优良的 n-γ 波形甄别特性, 通过定义甄别量 Dis 对 α 事例和电子事例筛选. 级联衰变链中, 要求 α 粒子的 Dis 大于其高斯平均值减去一倍 σ, 用以筛除电子反冲事例, 筛选效率为 84.13%. 图 12a 显示了²¹⁴Po 的 Dis 分布, 甄别因子与能量的二维图如图 12b 与图 12c 所示, 筛选效率为 100%.

(3) 时间间隔筛选: 对于²¹⁴Bi-²¹⁴Po-²¹⁰Pb 级联衰变, 时间间隔为 (0.5τ_{1/2}, 3τ_{1/2}); 对于²¹²Bi-²¹²Po-²⁰⁸Pb, 时间间隔为 (500 ns, 5τ_{1/2}); 对于²¹⁹Rn-²¹⁵Po-²¹¹Pb, 时间间隔为 (τ_{1/2}, 5τ_{1/2}). 如图 13 所示, 级联衰变的半衰期通过时间间隔图上的指数衰减拟合得出, 平滑部分通过拟合用于计算随机本底量.

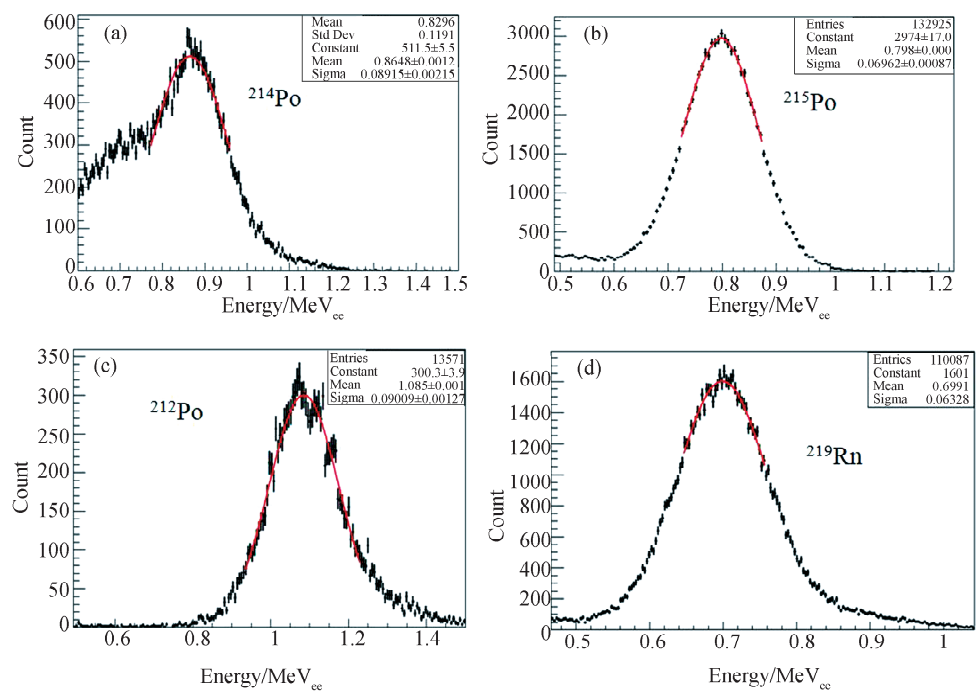


图 11 天然放射系的级联衰变链中实验所测 α 粒子的能量, 红色为高斯拟合线
Fig. 11 The measured energy of α particles for natural radioactivity series, the red line represent the Gaussian fit

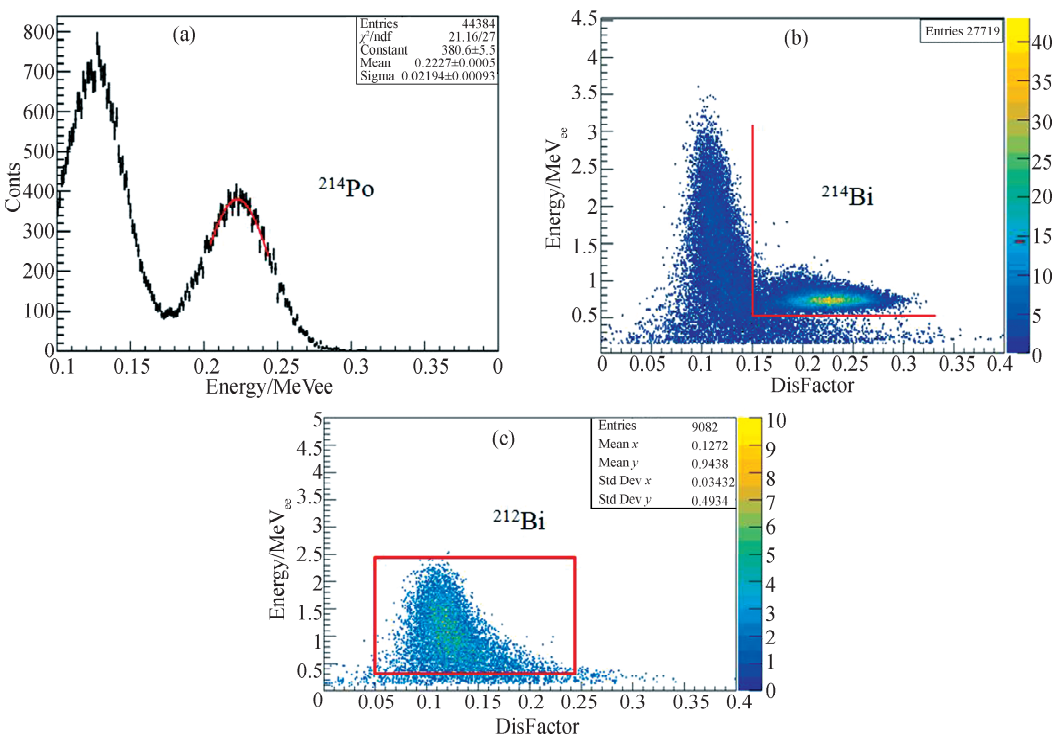


图 12 甄别因子筛选:(a) ^{214}Po 级联衰变 α 粒子甄别因子分布;(b) ^{214}Bi 中电子反冲事例筛选,红色分割线上方为筛选事例区间;(c) ^{212}Bi 电子反冲事例,线框内为电子反冲事例

Fig. 12 Selection of dis: (a) the distribution of α particles of ^{214}Po cascade decay; (b) the electron recoil events of ^{214}Bi and the upper of red line is ROI; (c) the electron events of ^{212}Bi and ROI is inside the box

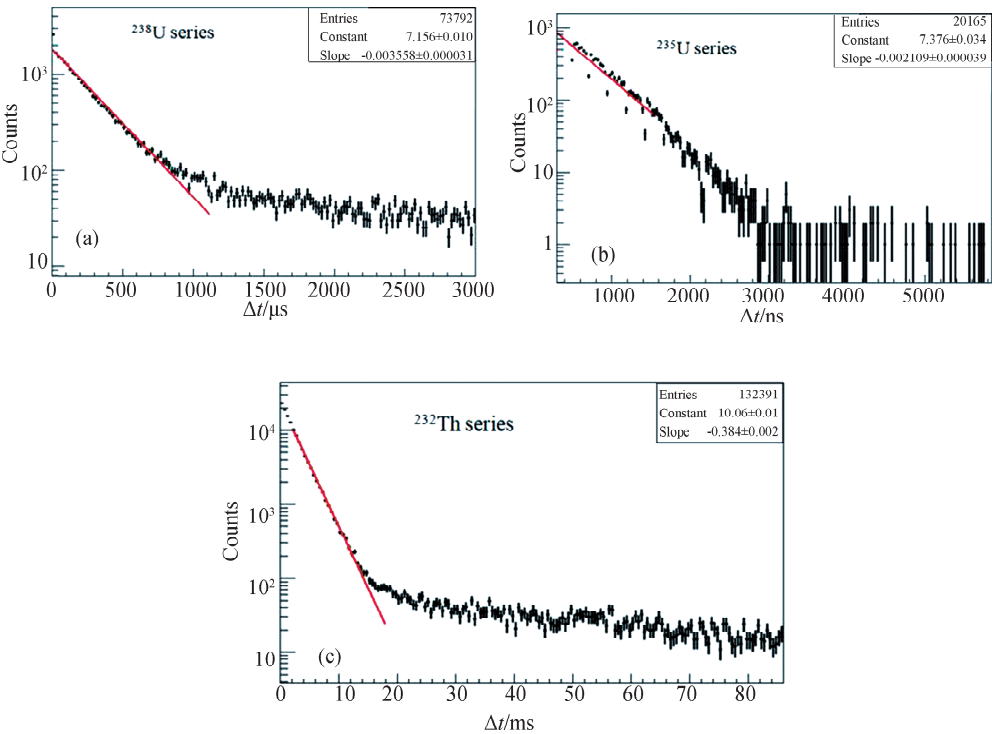


图 13 时间间隔筛选

Fig. 13 The discrimination of time interval

表 1 列出了筛选流程及各次筛选效率,考虑到随机本底计数,探测器效率,采数时间及 Gd-Ls 尺寸等因素,Gd-Ls 中会发生级联衰变并产生 α 粒子的 U/Th 衰变链中间产物分别是 ^{214}Po (0.113 ± 0.010) mBq/kg, ^{212}Po (0.139 ± 0.010) mBq/kg, ^{215}Po (0.835 ± 0.020) mBq/kg.

4.3 液闪中 α 本底总计数率

假设天然放射系处于长期平衡,根据上节衰变

链中间产物 Po 的含量,可计算出液闪中 ^{238}U , ^{232}Th 和 ^{235}U 的含量分别为 $(9.08 \pm 0.83) \times 10^{-12}$, $(5.35 \pm 0.38) \times 10^{-11}$ 和 $(1.04 \pm 0.03) \times 10^{-11}$ g/g,如表 2 所示. 此外,考虑放射性核素的 α 衰变分支比大于 1%时, ^{238}U , ^{232}Th 和 ^{235}U 的总 α 计数率分别为 (0.0227 ± 0.0001) , (0.0329 ± 0.0001) 和 (0.1471 ± 0.0002) s $^{-1}$. Gd-Ls 中 α 粒子总计数率为 (0.2027 ± 0.0004) s $^{-1}$.

表 1 级联衰变筛选效率及事例结果

Tab. 1 Efficiencies and results of discrimination of cascade decay

Cascade decay	$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$	$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	$^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po} \rightarrow ^{211}\text{Pb}$
Energy selection ϵ (first second signal)	91.3% 68.26%	87.96% 68.26%	68.26% 68.26%
PSD selection ϵ (first second signal)	100% 84.13%	100% 84.13%	84.13% 84.13%
Time interval selection ϵ	58.21%	28.25%	46.88%
Number of selection	17 375 $\pm$ 131.8	9 424 $\pm$ 97.1	58 040 $\pm$ 240.9
Number of random background	1 941.3 $\pm$ 44.1	496.7 $\pm$ 22.3	232.4 $\pm$ 15.24
Number of background subtracted	15 433.7 $\pm$ 124.2	8 927.3 $\pm$ 94.5	57 807.6 $\pm$ 240.4
Number of efficiency corrected	50 602.3 $\pm$ 413.2	62 560.4 $\pm$ 250.1	373 906.5 $\pm$ 611.5
The time of data/d	206	206	206
Mass of the Gd-Ls/kg	25.2	25.2	25.2
Activity mBq/kg	0.113 $\pm$ 0.010	0.139 $\pm$ 0.010	0.835 $\pm$ 0.020

表 2 掺钆液闪中的铀钍含量

Tab. 2 The U/Th contamination of Gd-Ls

Cascade decay	Activity/(mBq/kg)	Contamination of series/(g/g)
$^{214}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{214}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{210}\text{Pb}$	^{214}Po : 0.113 $\pm$ 0.01	^{238}U : $(9.08 \pm 0.83) \times 10^{-12}$
$^{212}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{212}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{208}\text{Pb}$	^{212}Po : 0.139 $\pm$ 0.01	^{232}Th : $(5.35 \pm 0.38) \times 10^{-11}$
$^{219}\text{Rn} \xrightarrow{\alpha} ^{215}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{211}\text{Pb}$	^{215}Po : 0.833 6 $\pm$ 0.02	^{235}U : $(1.04 \pm 0.03) \times 10^{-11}$

4.4 聚乙烯室快中子能谱重建

实验数据为 Gd-Ls 在 CJPL 聚乙烯实验室自 2018 年 4 月到 11 月结果,采数时间为 206 d. 通过数据筛选及 α 粒子计数率计算,核反冲谱如图 14 所示. 借助于 Geant4,模拟得到单能中子入射掺钆液闪探测器后的能谱响应,放射源采用将探测器包裹的单能中子面源. 采用与实验相同的数据分析方法,如粒子甄别,时间甄别,能量筛选等,并依据探测器效率考虑了淬灭效应下的高斯展宽. GRAVEL 算法用于 CJPL 地下实验室聚乙烯室内 的中子重建. 图 15 显示了 1~10 MeV 能区的快中子能谱. 能谱积分后得到 1~10 MeV 区间不含误差的快中子通量为 4.45×10^{-8} cm $^{-2}$ $\cdot$ s $^{-1}$.

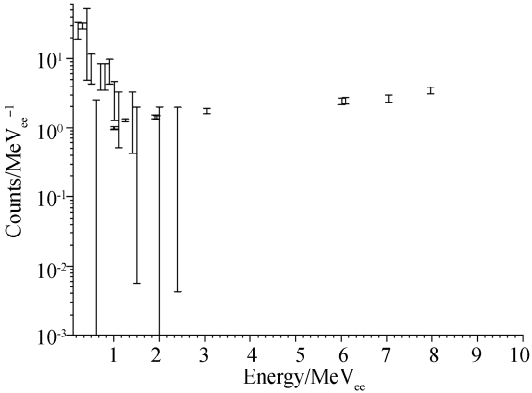


图 14 经数据筛选后的核反冲谱
Fig. 14 The recoil spectrum after data analysis

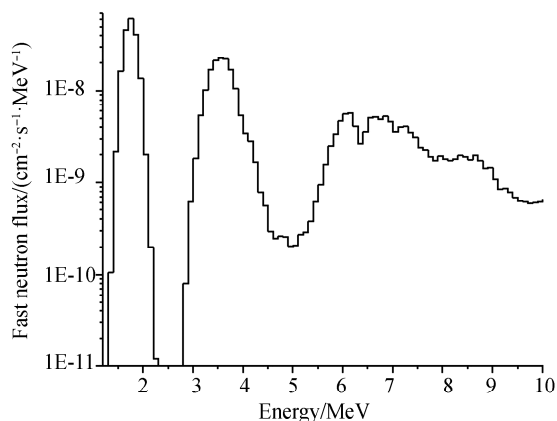


图 15 CJPL 聚乙烯实验室快中子能谱

Fig. 15 The fast neutron spectrum in PE room of CJPL

5 结 论

采用掺杂 0.5% 钆的液体闪烁体探测器测量了 CJPL 聚乙烯室内的快中子通量. 此外, 掺钆液闪中子探测器的 α 本底计数率为 $(0.202\ 7 \pm 0.000\ 4)\text{ s}^{-1}$. 借助于 Geant4 及 GRAVEL 算法, 完成了对聚乙烯实验室内的中子能谱重建, 快中子通量为 $4.45 \times 10^{-8}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 与 2015 年 CJPL 聚乙烯室的快中子通量 $(4.9 \pm 0.9(\text{stat.}) \pm 0.5(\text{syst.})) \times 10^{-9}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 相比, 探测器所处的实验环境发生了变化, 增设了 5 mm 厚铝板, 50 cm 厚的聚乙烯板. 聚乙烯的主要成分为碳和氢, 高能快中子与碳核主要发生 (α, n) 反应. 与世界上的其他深地实验室中子通量相比, 中国锦屏地下实验室中子通量处于极低水平, 非常有利于开展稀有事例探测实验. 目前, 关于探测器响应的单能中子淬灭效应正在实施中, 这一实验结果将有利于改善探测器的响应矩阵及能谱重建结果.

参考文献:

[1] The GERDA Collaboration, Agostini M, Allardt

M, *et al.* Background-free search for neutrinoless double- β decay of ^{76}Ge with GERDA [J]. *Nature*, 2017, 544: 47.

[2] Ahmad Q R, Allen R C, Andersen T C, *et al.* Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury neutrino observatory [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 071301.

[3] Fukuda S, Fukuda Y, Ishitsuka M, *et al.* Constraints on neutrino oscillations using 1258 days of super-kamiokande solar neutrino data [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 5656.

[4] Cheng J P, Kang K J, Li J M, *et al.* The China Jinping underground laboratory and its early science [J]. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2017, 67: 231.

[5] Zeng Z M, Gong H, Yue Q, *et al.* Thermal neutron background measurement in CJPL [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2015, 804: 108.

[6] Hu Q, Ma H, Zeng Z, *et al.* Neutron background measurements at China Jinping underground laboratory with a Bonner multi-sphere spectrometer [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2017, 859: 37.

[7] Tziaferi E, Carson M J, Kudryavtsev V A, *et al.* First measurement of low intensity fast neutron background from rock at the Boulby underground laboratory [J]. *Astropart Phys*, 2007, 27: 326.

[8] An F P, Bai J Z, Balantekin A B, *et al.* Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 171803.

[9] RENOCollaboration, Ahn J K, Baek S R, *et al.* RENO: An experiment for neutrino oscillation parameter θ_{13} using reactor neutrinos at Yonggwang [Z/OL]. arXiv: 1003.1391 [hep-ex], 2010.

[10] 何汉涛, 杜强, 林兴德. 环境中子测量中的偶然符合 α 事例修正 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 684.

引用本文格式:

中 文: 王桢, 何汉涛, 刘书魁, 等. 掺钆液闪探测器用于锦屏地下实验室的快中子本底测量 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2021, 58: 044004.

英 文: Wang Z, He H T, Liu S K, *et al.* Fast neutron background measurement at the China Jinping laboratory with a gadolinium-doped liquid scintillator detector [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2021, 58: 044004.