

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.04.016

环境中子测量中的偶然符合 alpha 事例修正

何汉涛¹, 杜强¹, 林兴德¹, 刘书魁¹, 唐昌建¹, 幸浩洋¹, 岳骞², 朱敬军³

(1. 四川大学物理学院, 成都 610064; 2. 清华大学工程物理系, 北京 100084;

3. 四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

摘要: 在暗物质直接探测实验中, 中子是十分重要的环境本底. 利用快慢符合法, 一个掺钷的液闪探测器被分别用于测量了世界最深的地下实验室—中国锦屏地下实验室的实验大厅及 1 m 厚聚乙烯房间内的快中子本底通量及能谱. 由于液闪无法通过信号波形区分中子与 alpha 事例, 因此液闪中长寿的 U/Th 核素衰变放出的 alpha 粒子是必须考虑的本底之一. 在长期平衡假设条件下, 实验测得液闪内部 alpha 粒子的总计数率为 $(0.548 \pm 0.002) \text{ s}^{-1}$, 再通过偶然符合算法, 可得到实验大厅 356 天总计 2682 个中子候选事例中, 有 6 个偶然符合的 alpha 事例; 聚乙烯房间 173 天总计 44 个中子候选事例中, 有 2 个偶然符合的 alpha 事例. 偶然符合的 alpha 粒子对大厅的快中子通量测量结果影响可以忽略, 而对聚乙烯房间中的通量结果约有 4% 的影响.

关键词: 放射性原子核衰变; 偶然符合; 液体闪烁体; alpha 粒子; 快中子; 地下实验室

中图分类号: O571.32+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)04-0684-05

Accidental alpha-event correction in the measurement of environmental neutrons

HE Han-Tao¹, DU Qiang¹, LIN Xing-De¹, LIU Shu-Kui¹, TANG Chang-Jian¹,
XING Hao-Yang¹, YUE Qian², ZHU Jing-Jun³

(1. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In the dark matter direct detection experiment, neutrons are important environmental background. In the China Jinping Underground Laboratory (CJPL), the world's deepest underground laboratory, a gadolinium doped liquid scintillator (Gd-LS) detector was used to measure the fluxes and spectra of fast neutron background in the Hall and in a room with one meter thick polyethylene (PE) walls by fast-slow time coincident method. Liquid scintillators are incapable to discriminate neutrons and alpha-particles by their pulse shapes. Thus, the alpha-particle background from the long-lived U/Th nuclides inside the liquid scintillator has to be taken into account. Assuming secular equilibrium, the total rate of the alpha-decays in the detector was measured to be $(0.548 \pm 0.002) \text{ s}^{-1}$. Then in the Hall, the number of random coincident alpha-events was determined to be 6 out of 2682 neutron candidates based on 356 days of data. And for the PE room, this value is 2 out of 44 neutron candidates with 173 days of data. The

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(11275134, 11475117, 11475099); 中央高校基本科研业务费专项资金(20826041A4142)

作者简介: 何汉涛(1993-), 男, 四川绵阳人, 硕士, 主要研究领域为暗物质及中子探测. E-mail: 583767306@qq.com

通讯作者: 林兴德. E-mail: stlin@scu.edu.cn

influence of the random coincident alpha-particles are negligible for the result of fast neutron flux in the Hall, but have around 4% for the measurement in the PE room.

Keywords: Radioactive nuclear decay; Random coincidence; Liquid scintillator; Alpha-particle; Fast neutron; Underground laboratory

1 引言

液体闪烁体拥有极快速的响应时间和有效的粒子波形甄别能力,因此被广泛用于中子探测实验^[1,2]. 几乎所有物质中都含有一定水平的 U/Th 污染,液闪也不例外. U/Th 衰变链中有很多核素能发生 alpha 衰变^[3,4],而液闪对中子和 alpha 粒子具有几乎相同的波形响应,无法通过波形甄别的方法将其区分,因此纯净的液闪对中子的探测灵敏度极大地受到液闪自身的 alpha 放射性衰变影响.

掺 Gd 液体闪烁体 (Gadolinium doped liquid scintillator, Gd-LS) 中的 Gd 可以在中子被液闪中的原子核慢化之后,将其俘获并放出一组总能量约 8 MeV 的 gamma 光子. 通过高能 gamma 信号与核反冲信号的时间符合,可以将中子从本底 (尤其是 alpha 粒子本底) 中有效识别出来,从而提高探测器对中子的探测灵敏度.

中国暗物质实验 (China Dark Matter Experiment, CDEX)^[5] 在中国锦屏地下实验室 (China Jinping Underground Laboratory, CJPL)^[6] 采用高纯锗探测器开展了大质量弱相互作用暗物质粒子 (WIMPs) 的直接探测实验,实验在一个 1 m 厚的聚乙烯 (PE) 室中展开^[7], PE 室的作用为屏蔽来自岩石中的中子. 中子在探测器中能产生与 WIMPs 相似的核反冲信号,而在暗物质实验中无法区分 WIMPs 信号与中子信号,因此 CDEX 实验组采用了一个 Gd-LS 探测器对 CJPL 实验大厅 (Hall) 及 PE 室中残留的快中子本底进行了测量^[8].

Gd-LS 探测器在中子测量中虽然能极大地压低 alpha 粒子本底,但是依然会有少数偶然符合的 alpha 事例,文献^[8]中直接给出了偶然符合本底的结果,对计算方法并未说明. 本文详细讨论了 alpha 粒子偶然符合本底在 CJPL 环境稀有中子事例测量中的计算修正,对于探测器的结构、探测器的刻度及 CJPL 中子实验数据的分析仅在第二部分做简要介绍,具体可参见文献^[8]. 本文所采用的方法,同样也适用于其他粒子物理或核物理实验中的偶然符合本底计算.

2 中国锦屏地下实验室快中子本底测量

2.1 掺 Gd 液体闪烁体探测器

体积为 28 L 的 Gd-LS 灌装于一个圆柱形 (直径 30 cm, 长 40 cm) 的石英玻璃容器 (glass container) 中,液闪为 Eljen Technology 公司生产的掺 Gd 质量百分比为 0.5% 的 EJ-335^[9]. 玻璃容器的两端为用光导 (light guide) 连接的两个光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 用于闪烁光的收集,如图 1 所示. 整个探测器放置于一个厚度为 5 cm 铅屏蔽体中,用于屏蔽环境中的放射性 gamma. 两个 gamma 放射源 ⁶⁰Co 和 ¹³⁷Cs 被用于探测器的能量刻度,探测器对中子的探测效率由一个 AmBe 中子源进行刻度^[8].

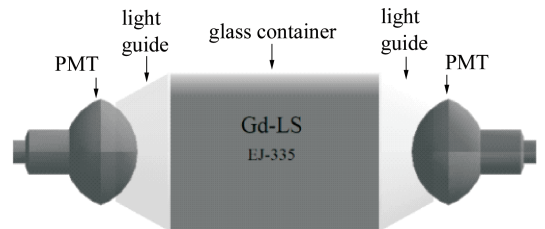


图 1 掺 Gd 液体闪烁体探测器结构
Fig. 1 The structure of the Gd-LS detector

2.2 中子探测原理

中子进入探测器灵敏区域后,首先会通过液闪中的原子核 (主要是氢核) 发生多次弹性碰撞损失能量,产生一个核反冲信号 (快信号, fast signal); 中子被慢化至热中子后,会被液闪中的 Gd 俘获并产生一个高能的 gamma 信号 (慢信号, slow signal). 对于液闪 EJ-335,快信号与慢信号的平均时间间隔约为 $7 \mu\text{s}$,主要取决于掺 Gd 的比例.

实验数据分析中,首先挑选沉积能量大于 3 MeV 的 gamma 信号作为慢信号,这一条件可以排除大部分环境中的放射性 gamma 本底,尤其是来自于 ²⁰⁸Tl 的 2.6 MeV gamma 本底. 其次,将挑选出的慢信号的前一个事例作为中子引起的核反冲信号的候选事例,即快信号,并要求快慢信号之间的时间间隔在 $2 \sim 30 \mu\text{s}$ 之间. 最后再通过波形甄

别将偶然符合的 gamma 事例排除. 快慢信号的时间符合示意图如图 2 所示.

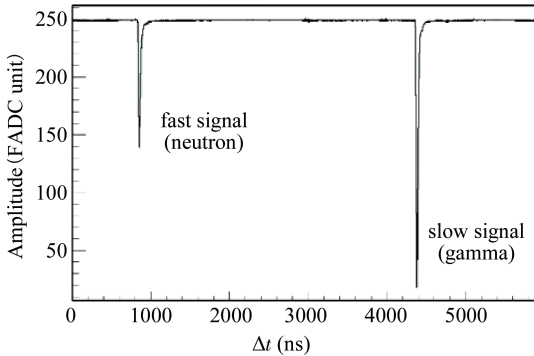


图 2 快慢信号时间符合示意图

Fig. 2 Time coincidence of fast and slow signals

2.3 CJPL 快中子本底测量

探测器被先后放置于 CJPL 实验大厅和 PE 室中测量环境中的快中子本底^[8]. 基于 356.28 天的实验数据, 在未考虑 alpha 粒子偶然符合的情况下, CJPL 大厅中共挑选出 2682±61 个中子候选事例, 探测效率为 (11.13±0.42)%, 探测器灵敏区域的表面积为 5184 cm², 得到大厅中能量在 1~10 MeV 的快中子通量为 (1.51±0.03)×10⁻⁷ cm⁻²·s⁻¹. 对于 PE 室, 基于 173.55 天的实验数据, 在未考虑 alpha 粒子偶然符合的情况下, 共挑选出 44±7 个中子候选事例, 对应的快中子通量为 (5.1±0.9)×10⁻⁹ cm⁻²·s⁻¹, 如表 1 所示^[8].

表 2 掺 Gd 液闪 EJ-335 中的 U/Th 含量(探测器液闪总质量为 25.2 kg)

Tab. 2 The intrinsic U/Th contaminations in the Gd-LS type EJ-335 (the mass of the Gd-LS is 25.2 kg)

Decay sequence	Measured activity (mBq)	Contaminations of long-lived parents (g/g)	Contaminations of series (g/g)
$^{212}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{212}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{208}\text{Pb}$	$^{212}\text{Po}: 3.62 \pm 0.09$	$^{228}\text{Th}: (7.40 \pm 0.21) \times 10^{-21}$	$^{232}\text{Th}: (5.54 \pm 0.15) \times 10^{-11}$
$^{214}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{214}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{210}\text{Pb}$	$^{214}\text{Po}: 45.26 \pm 0.22$	$^{226}\text{Ra}: (4.92 \pm 0.02) \times 10^{-17}$	$^{238}\text{U}: (1.45 \pm 0.01) \times 10^{-10}$
$^{219}\text{Rn} \xrightarrow{\beta^-} ^{215}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{211}\text{Pb}$	$^{215}\text{Po}: 21.70 \pm 0.20$	$^{227}\text{Ac}: (3.22 \pm 0.03) \times 10^{-19}$	$^{235}\text{U}: (1.07 \pm 0.01) \times 10^{-11}$

^{212}Po 、 ^{214}Po 和 ^{215}Po 的 alpha 衰变活度测量结果如表 2 所示, 具体数据分析和计算方法可参见文献^[10]. 对于长寿命母体 ^{228}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{227}Ac 的含量可直接由其半衰期计算得到. 在长期平衡的假设条件下, 液闪中的 U/Th 含量计算结果也列于表 2 中^[10].

3.2 液闪 EJ-335 中的 alpha 衰变总活度

由表 2 所示的液闪 EJ-335 中 ^{212}Po 、 ^{214}Po 和 ^{215}Po 的 alpha 衰变活度, 考虑 ^{232}Th 、 ^{238}U 和 ^{235}U 衰变链上各核素的 alpha 衰变分支比, 在长期平衡的假

表 1 CJPL 快中子候选事例及初步通量

Tab. 1 The selected fast neutron candidates and raw neutron flux at CJPL

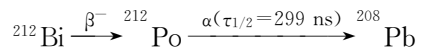
	CJPL Hall	CJPL PE room
# of selected neutron candidates	2682±61	44±7
Live time (day)	356.28	173.55
Total surface of the detector (cm ²)	5184	5184
Raw neutron flux (cm ⁻² ·s ⁻¹)	(1.51±0.03)×10 ⁻⁷	(5.1±0.9)×10 ⁻⁹

3 CJPL 环境中子测量中的 alpha 粒子偶然符合

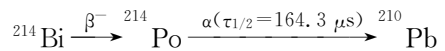
3.1 液闪 EJ-335 中的 U/Th 含量

U/Th 衰变链中的 β-α 及 α-α 级联衰变被用于计算液闪 EJ-335 的 ^{232}Th 、 ^{238}U 和 ^{235}U 的含量.

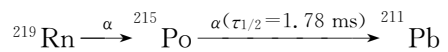
对于 ^{232}Th 衰变链,



对于 ^{238}U 衰变链,



对于 ^{235}U 衰变链,



设条件下, 可得到衰变链上各核素的 alpha 衰变活度, 其结果见表 3, 其中衰变分支比小于 1% 的核素未考虑. 进而, 可得到该探测器液闪中 alpha 衰变的总计数率为 (0.548±0.002) s⁻¹.

3.3 alpha 粒子偶然符合本底计算

在 CJPL 的环境中子测量数据分析中, 要求: (1) 慢信号—gamma 信号的能量 $E_\gamma > 3\text{ MeV}$; (2) 快信号与慢信号的时间间隔 $2\ \mu\text{s} < \Delta t < 30\ \mu\text{s}$; (3) 快信号波形满足中子信号波形条件.

表 3 探测器液闪中 U/Th 衰变链上各核素的 alpha 衰变活度

Tab. 3 The activity of alpha decays of all nuclides for the U/Th decay chains in the Gd-LS

Decay chain	Th-232 decay chain [(3.62±0.09) mBq]	U-238 decay chain [(45.26±0.22) mBq]	U-235 decay chain [(21.70±0.20) mBq]
Nuclide; activity of alpha decay	²³² Th: 1.56	²³⁸ U: 1.00	²³⁵ U: 1.00
	²²⁸ Th: 1.56	²³⁴ U: 1.00	²³¹ Pa: 1.00
	²²⁴ Ra: 1.56	²³⁰ Th: 1.00	²²⁷ Ac: 0.0138
	²²⁰ Rn: 1.56	²²⁶ Ra: 1.00	²²⁷ Th: 0.9862
	²¹⁶ Po: 1.56	²²² Rn: 1.00	²²³ Ra: 1.00
	²¹² Bi: 0.56	²¹⁸ Po: 1.00	²¹⁹ Rn: 1.00
	²¹² Po: 1.00	²¹⁴ Po: 1.00	²¹⁵ Po: 1.00
	—	²¹⁰ Po: 1.00	²¹¹ Bi: 1.00
Total rate of alpha decays	(0.034±0.001) s ⁻¹	(0.362±0.002) s ⁻¹	(0.152±0.001) s ⁻¹

尽管挑选中子的条件极其严格,但由于液闪中存在大量的来自 U/Th 衰变链上的 alpha 粒子,并且液闪无法从波形上区分中子信号与 alpha 粒子信号,因此依然会有偶然符合的 alpha 粒子通过上述的筛选条件.

偶然符合的 alpha 粒子本底计数率 R_{bg} 可由液闪中总的 alpha 粒子计数率 R_{α} 、能量大于 3 MeV 的 gamma 信号计数率 R_{γ} 以及探测器总的计数率 R_{total} 由下式计算得到:

$$R_{bg} = \frac{R_{\alpha}}{R_{total}} \times \frac{R_{\gamma}}{R_{total}} \times R_{total} \quad (1)$$

R_{bg} 为时间间隔在 $(0, +\infty)$ μs 内的所有 alpha 粒子偶然符合计数率. 偶然符合的时间间隔服从衰减常数为 R_{total} 的指数衰减分布,在时间间隔 $(2, 30)$ μs 内偶然符合事例数的占比 $Ratio$ 可由下式计算:

$$Ratio = \frac{C \int_0^{30\mu s} e^{-R_{total}t} dt}{C \int_0^{+\infty} e^{-R_{total}t} dt} \quad (2)$$

其中 C 为一个常数. 考虑地下实验室环境中子测量取数时间 T 后,偶然符合的 alpha 事例数 N_{bg} 计算如下:

$$N_{bg} = R_{bg} \times Ratio \times T \quad (3)$$

CJPL 大厅和 PE 室的偶然符合 alpha 粒子本底(background, bg.) 计算结果如表 4 所示. 在扣除掉偶然符合的 alpha 粒子本底之后,得到 CJPL 大厅和 PE 室 1~10 MeV 能量区间的快中子通量分别为 $(1.51 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $(4.9 \pm 0.9) \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 结果列于表 4 中.

表 4 CJPL 环境中子测量中的偶然符合 alpha 粒子本底
Tab. 4 The alpha background estimation for environmental neutron measurement at CJPL

	CJPL Hall	CJPL PE room
Rate of alpha R_{α} (s ⁻¹)	0.548±0.002	0.548±0.002
Rate of gamma R_{γ} (10 ⁻³ s ⁻¹) ^①	12.45±0.02	6.63±0.02
Total rate of the detector R_{total} (s ⁻¹)	27.90	8.84
Lively time T (day)	356.28	173.55
# of random coincident alpha (N_{bg}) ^②	5.88±0.03	1.52±0.01
# of raw neutron candidates	2682±61	44±7
# of alpha-bg. subtracted neutrons	2676±61	43±7
Final fast neutron flux (cm ⁻² s ⁻¹)	$(1.51 \pm 0.03) \times 10^{-7}$	$(4.9 \pm 0.9) \times 10^{-9}$

① $E_{\gamma} > 3 \text{ MeV}$; ② $2 \mu s < \Delta t < 30 \mu s$

4 结 论

基于掺 Gd 液闪 EJ-335 中 U/Th 衰变链上的 β - α 和 α - α 级联衰变的实验数据,在长期平衡假设条件下,并考虑衰变链上所有的 alpha 衰变核素,得到探测器中液闪总的 alpha 衰变计数率为 $(0.548 \pm 0.002) \text{ s}^{-1}$. 进而计算了在 CJPL 环境中子测量实验中, alpha 粒子与大于 3 MeV 的 gamma 信号在 2~30 μs 时间间隔内偶然符合的事例数.

在扣除 alpha 粒子本底后,得到 CJPL 实验大厅和 PE 室内 1~10 MeV 的快中子通量分别为 $(1.51 \pm 0.03) \times 10^{-7}$ 和 $(4.9 \pm 0.9) \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 与未考虑 alpha 粒子偶然符合的结果相比,大厅环境中子通量的测量中 alpha 粒子的偶然符合本底可以忽略不计;而在 PE 室中,由于 1 m 厚的聚乙烯墙壁对来自岩石中放射性中子的有效屏蔽,使得 PE 室中快中子通量能达到一个极低的水平,这时 alpha 粒子的偶然符合本底不可忽略,对中子通量约有 4% 的影响.

参考文献:

- [1] Zhang C, Mei D M, Davis P, *et al.* Measuring fast neutrons with large liquid scintillation detector for ultra-low background experiments [J]. Nucl Instrum Meth A, 2008, 584: 238.
- [2] Erchinger J L, Orrell J L, Aalseth C E, *et al.* Background characterization of an ultra-low background liquid scintillation counter [J]. Nucl Instrum Meth A, 2017, 126: 168.
- [3] 罗荡慰, 白立新. 基于 β 稳定线和 α 衰变能对液滴模型和原子核球堆积模型比较研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 54: 1029.
- [4] 孙小东, 郭萍, 李小华. 通过铀同位素的 alpha 衰变研究核势的同位旋效应 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 597.
- [5] Kang K J, Cheng J P, Li J, *et al.* Introduction to the CDEX experiment [J]. Front Phys, 2013, 8: 412.
- [6] 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.
- [7] Zhao W, Yue Q, Kang K J, *et al.* Search of low-mass WIMPs with a p-type point contact germanium detector in the CDEX-1 experiment [J]. Phys Rev D, 2016, 93: 092003.
- [8] Du Q, Lin S T, *et al.* Measurement of the fast neutron background at the China Jinping underground laboratory [J]. Nucl Instrum Meth A, 2018, 889: 105112.
- [9] Eljen Technology. Gadolinium loaded EJ-331, EJ-335 [EB/OL]. [2018-03-01]. <http://www.eljen-technology.com/products/liquid-scintillators/ej-331-ej-335>.
- [10] Du Q, Lin S T, He H T, *et al.* Response of gadolinium doped liquid scintillator to charged particles: measurement based on intrinsic U/Th contamination [EB/OL]. J Instrum, DOI: 10.1088/1748-0221/13/04/P04001.

引用本文格式:

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

英文: He H T, Du Q, Lin X D, *et al.* Accidental alpha-event correction in the measurement of environmental neutrons [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 684.