

基于 Geant4 的裂变核素中子角关联分布 数值模拟

王 鹏, 黎素芬, 王 飞, 李凯乐
(火箭军工程大学 核工程学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为了打破目前通过实验手段对中子角关联进行测量时受到实验条件限制的问题, 使用蒙特卡洛方法, 依托 Geant4 软件搭建了一套中子角关联测量模型, 对 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 以及 ^{252}Cf 进行数值模拟, 得到了这 5 种裂变核素的中子角关联分布。结果表明: 在相同条件下, 不同裂变核素之间的中子角关联分布存在差异; 使用测量模型得到的不同核素中子角关联分布与国外实验结果重合度较高。

关键词: 核材料裂变核素; 中子角关联分布; Geant4 软件; 测量模型

中图分类号: TL77

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)04-098-010

Numerical Simulation of Geant4-based Neutron Angular Correlation Distribution of Fission Nuclides

WANG Peng, LI Sufen, WANG Fei, LI Kaile
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To solve the problem that the measurement performance of neutron angular correlation by experimental means is always restrained by experimental conditions, a set of neutron angular correlation measurement model was built by Monte Carlo method and Geant4 software. Based on the proposed models, the neutron angular correlation distributions of ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu and ^{252}Cf were obtained by numerical simulation. Results showed that under the same conditions, there are differences in the distribution of neutron angular correlation among different fission nuclides. The neutron angular correlation distribution of different nuclides obtained by the proposed models is in good agreement with abroad experimental results.

KEYWORDS: nuclear material fission nuclide; neutron angular correlation distribution; Geant4 software; measurement model

由于核裂变能在反应过程中释放出大量的能量, 其在能源以及军事领域产生了巨大的影响。针对核材料性质的研究从未间断。1948 年 De-Benedetti 等使用 Pb-Be 源诱发 ^{235}U 裂变, 并在不同角度下对原子核裂变所发射中子进行测量, 发

现了裂变中子的发射呈各向异性, 它们更加倾向相反的方向发射。裂变原子单次裂变平均释放 2 个以上具有时间关联性的符合中子, 对于单次裂变释放 2 个符合中子, 则称为二重符合中子^[1]。若是对核材料的二重符合中子计数进行测量, 会观测

收稿日期: 2024-05-08

第一作者: 王鹏 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事国际核保障监督与军控核查研究。E-mail: 1305807586@qq.com

引用格式: 王鹏, 黎素芬, 王飞, 等. 基于 Geant4 的裂变核素中子角关联分布数值模拟[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (4): 98-107.

到二重符合中子计数会跟随观测角的变化而变化^[2-3]。常见的裂变核素主要有²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu、²⁴⁰Pu 及²⁵²Cf。其中,²³⁵U、²³⁹Pu 以诱发裂变为主,而²³⁸U、²⁴⁰Pu 和²⁵²Cf 以自发裂变为主。美国密歇根大学和法国斯特拉斯堡大学分别测量过²⁴⁰Pu 及²⁵²Cf 的中子角关联分布^[4],俄罗斯彼得堡核物理研究所等机构使用过符合中子计数装置具体观测过²³³U、²³⁵U 和²³⁹Pu 的中子角关联分布^[5-6]。实验结果表明,核材料的中子角关联分布与核材料的核素种类^[7]、泄漏增殖系数^[8]以及氧化性^[9]等有一定的关系。目前,国外对裂变核素中子角关联的研究主要以实验方式为主,很少以中子角关联测量装置为原型,去使用数值模拟手段开展相应的研究。

本文通过 Geant4 仿真软件,搭建了一套2层、每层8个BC501A 闪烁体探测器的中子角关联测量模型,耦合劳伦斯利弗莫尔国家实验室开发的裂变反应事件产额算法(Fission Reaction Event Yield Algorithm, FREYA)程序包,对裂变过程进行逐事件模拟,测得²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu、²⁴⁰Pu 以及²⁵²Cf 的中子角关联分布,并将所得结果与密歇根大学、斯特拉斯堡大学以及彼得堡核物理研究所的实验和仿真结果进行了比对,验证了所搭建测量模型的准确性,为后续通过数值模拟手段研究中子角关联与泄漏增殖系数的关系打下了良好基础。

1 中子角关联原理

核材料的二重符合中子计数随着测量角度的变化而呈现出关联分布的主要原因是原子核裂变时中子各向异性发射。目前,能够较为成功解释原子核裂变时中子各向异性发射现象的是“质心系中子蒸发模型”^[10]理论。

1.1 质心系中子蒸发模型

以中子诱发原子核进行单次裂变为例,在“质心系中子蒸发模型”中,原子核的裂变过程被概括为以下3个步骤。

1) 原子核被外来中子激发后,能量高于原子的结合能,原子核发射中子以及 γ 射线以释放能量。在原子核达到热平衡前,原子核释放约0.1个中子。与裂变碎片蒸发的中子相比,此时中子的发射呈各向同性,但只占裂变全过程发射中子的10%~20%,如图1所示。其中,LF 是小质量的裂

变碎片,HF 是大质量的裂变碎片, n 为原子核所发射的中子, t 为原子核裂变的时间。

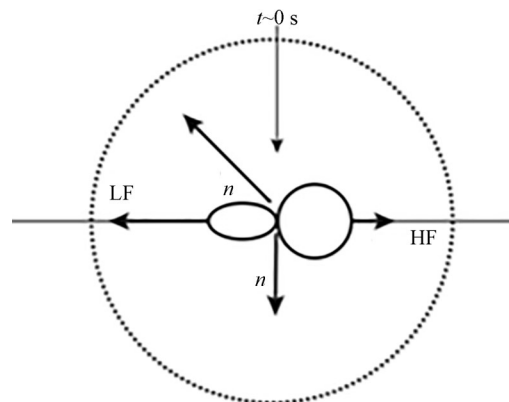


图1 分裂前的原子核

Fig. 1 Nucleus before splitting

2) 当原子核达到热平衡时,形成复合核,原子核处在激发态。之后,原子核的激发能高于中子的分离能,原子核释放中子,直到其激发能降至中子分离能以下。此过程中,原子核可释放1~3个中子,占裂变全过程中发射中子数的80%~90%。

3) 复合核分裂成2个裂变碎片,两碎片均处于高激发态,通过蒸发第(2)步中的中子和 γ 光子,持续释放能量,直至裂变碎片处于平衡态,如图2所示。

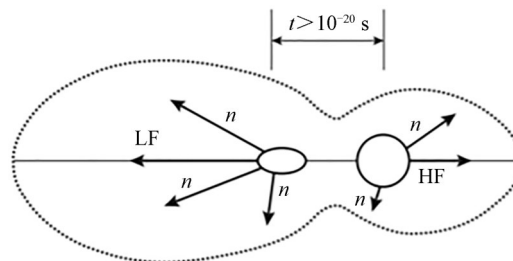


图2 裂变碎片蒸发中子

Fig. 2 Evaporation of neutrons from fission fragments

由质心系中子蒸发模型所描述的原子核裂变的物理过程可知,在原子核裂变的过程中,原子核通过释放中子,使其激发能降至中子分离能以下,随后原子核分裂,裂变碎片沿裂变轴向相反方向蒸发中子,导致了裂变中子的各向异性分布^[11-12]。在中子角关联的研究中,重点关注占比较大、被裂变碎片蒸发出来的中子^[13]。

1.2 中子角关联分布

单次裂变事件中核材料发射的中子之间有时间关联性(2个中子引起脉冲信号的时间间隔为

10^{-13} s 量级), 把 2 个探测器探测到 2 个具有时间关联性的中子记录为 1 次二重符合中子计数。统计探测器对的不同中子时差对应的二重符合中子计数, 所得到的分布就是该探测器对的中子时差分布。

一般地, 基于有机闪烁体探测器的中子角关联测量装置会有 2 个以上的探测器。在有 N 个探测器的中子角关联测量装置中, 使用 $H_{ij}(\Delta_t)$ 来表示探测器 i 和探测器 j 所组成的探测器对的中子时差分布, 将所有的 $H_{ij}(\Delta_t)$ 相加, 可以得到总中子时差分布为

$$H_{\text{tot}}(\Delta_t) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N H_{ij}(\Delta_t) \quad (1)$$

则该中子角关联测量装置的二重符合中子计数为

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} H_{\text{tot}}(\Delta_t) \quad (2)$$

先以一个探测器对为例, 该探测器对的时差分布为 $H_{ij}(\Delta_t)$, 为了消除探测器立体角结构不同和探测器不均匀性的影响, 可以进行一个简单的处理得到它的单点校正时差分布为

$$H_{ij}^*(\Delta_t) = \frac{H_{ij}(\Delta_t)}{S_i S_j} \quad (3)$$

式中: S_i 和 S_j 分别为探测器 i 和探测器 j 的单个中子计数。而一个探测器对 (探测器 i 和探测器 j) 单点校正后的相对符合计数 D_{ij}^* 为

$$D_{ij}^* = \int_{-\infty}^{\infty} H_{ij}^*(\Delta_t) \quad (4)$$

将相同角度的探测器对归为一个角群, 若角群中含有 K 个探测器对, 则角群的相对符合计数的平均值为

$$W(\angle) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K D_k^* \quad (5)$$

求出测量装置中所有角群相对符合计数的平均值后, 便可以得到核材料的中子角关联分布, 此时会发现相对符合计数随着观测角的变化而变化^[8]。

2 中子角关联分布数值模拟研究

2.1 中子角关联测量模型搭建

本文采用 Geant4 软件的 10.6 版本对中子角关联测量装置以及待测样品进行建模。尽管 Geant4 软件中自带有超铀元素裂变数据库, 但其采用的裂变模型为“平均裂变模型”, 无法逐事件模拟原子核的裂变过程, 同时不包含原子核裂变时的中

子多重数以及角度信息。FREYA 程序包中包含有基于大量实验观测的常见裂变核素的裂变数据, 采用的裂变模型为“质心系中子蒸发模型”^[14], 能够逐事件模拟原子核的裂变过程且会提供中子多重数及角度信息, 故本文采用 FREYA 程序包耦合 Geant4 软件的方式来对裂变核素的裂变过程进行逐事件模拟^[15]。其中, 探测器以及核材料的几何搭建通过 DetectorConstruction.cc 文件实现, 探测器文件的输出通过 EventAction.cc 文件实现, 裂变库的调用通过 G4FissionLibrary_new.cc 和 G4FissLib_new.cc 文件实现, 物理过程的调用通过 NeutronHPphysics.cc 和 PhysicsList.cc 文件实现, 自发裂变核素的裂变以及裂变强度设置通过 SponFissIsotope.cc 和 PrimaryGeneratorAction.cc 文件实现, 粒子信息的提取通过 SteppingAction.cc 文件实现。

中子角关联测量模型的几何构型如图 3 所示。

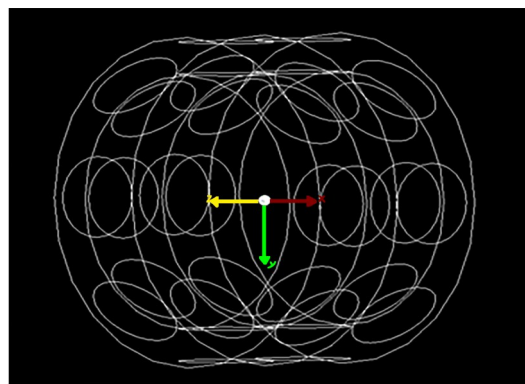


图 3 中子角关联测量模型几何构型

Fig. 3 Geometric configuration of the neutron angular correlation measurement model

搭建的测量模型为 2 层且每层由 8 个 BC501A 有机闪烁体探测器构成的“井型”测量模型。其中将 BC501A 有机闪烁体探测器建模成了半径为 6.35 cm、高为 5.08 cm 的圆柱体。测量装置的几何中心放置由单一裂变核素构成的待测核材料, 核材料距离测量腔内壁 20 cm, 如图 4 所示。

该中子角关联测量模型中共有 120 个探测器对, 通过计算探测器对夹角的余弦值发现具有 9 种不同的角度, 故分为 9 个角群研究裂变核素的中子角关联分布, 角群及角群中包含的探测器对数目如表 1 所示。

2.2 奇核核素诱发裂变数值模拟

对 ^{235}U 及 ^{239}Pu 的诱发裂变进行了模拟仿真。其中: ^{235}U 和 ^{239}Pu 的质量均设置为 30 g, 形状均设

置为球体；设置了 1 000 000 个 0.025 3 eV 能量的中子轰击核材料，对这 2 种裂变核素进行了 4 次仿真。根据式（2）～（5），得到了²³⁵U 以及²³⁹Pu 在诱发裂变条件下各角群的相对符合计数的平均值 $W(\angle)$ 。²³⁵U 的数值模拟结果如表 2 所示。

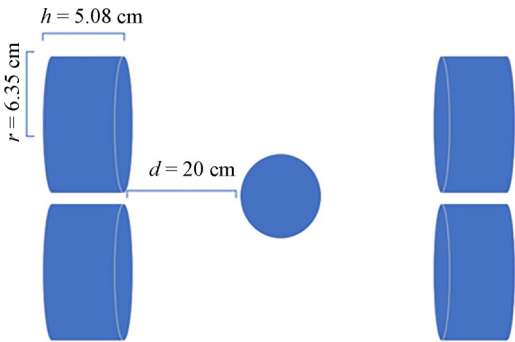


图 4 测量腔布局

Fig. 4 Layout of the measurement chamber

表 1 测量模型角群情况
Tab. 1 Angular groups of the measurement model

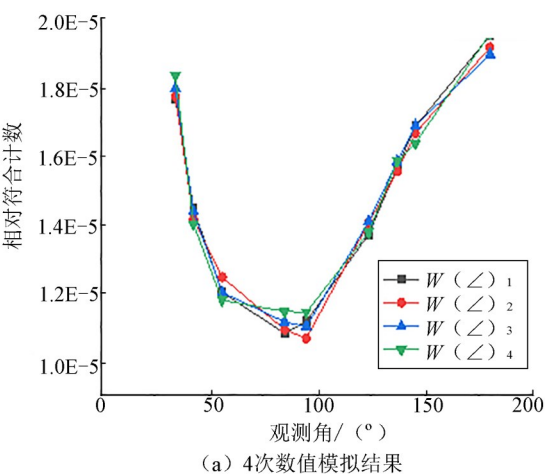
角群 $\angle$	余弦值	探测器数目/对
180.000 000 00	−1.000 000 0	8
145.494 822 30	−0.824 075 0	8
137.127 623 20	−0.732 871 0	16
123.844 786 30	−0.556 945 0	16
95.046 436 51	−0.087 963 1	16
84.953 563 49	0.087 963 1	16
56.155 213 68	0.556 945 0	16
42.872 376 79	0.732 871 0	16
34.505 177 73	0.824 074 0	8

根据数值模拟结果绘制出裂变核素²³⁵U 诱发裂变的中子角关联分布如图 5 所示。

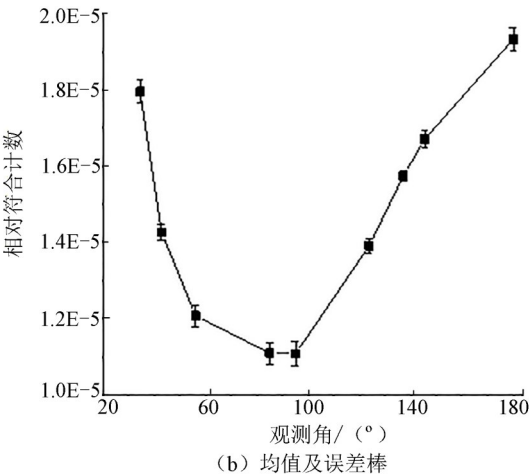
表 2 30 g ²³⁵U 球体角群相对符合计数平均值

Tab. 2 Average values of relatively conforming counts of angular groups of 30 g ²³⁵U spheroid

$\angle$	$W(\angle)_1$	$W(\angle)_2$	$W(\angle)_3$	$W(\angle)_4$	相对符合计数	
					均值	标准差
180.000 00	1.953 89E−5	1.919 31E−5	1.897 78E−5	1.959 88E−5	1.932 71E−5	2.936 30E−7
145.494 82	1.687 85E−5	1.667 29E−5	1.690 08E−5	1.638 05E−5	1.670 82E−5	2.413 59E−7
137.127 62	1.568 18E−5	1.555 92E−5	1.585 38E−5	1.586 12E−5	1.573 90E−5	1.457 44E−7
123.844 79	1.371 93E−5	1.406 01E−5	1.409 03E−5	1.377 71E−5	1.391 17E−5	1.906 37E−7
95.046 44	1.116 91E−5	1.066 74E−5	1.101 33E−5	1.143 56E−5	1.107 13E−5	3.208 25E−7
84.953 56	1.082 09E−5	1.092 82E−5	1.115 58E−5	1.146 00E−5	1.109 12E−5	2.827 25E−7
56.155 21	1.201 51E−5	1.246 26E−5	1.201 37E−5	1.179 09E−5	1.207 06E−5	2.817 72E−7
42.872 38	1.447 02E−5	1.416 63E−5	1.438 82E−5	1.401 95E−5	1.426 11E−5	2.059 20E−7
35.505 18	1.768 93E−5	1.770 00E−5	1.799 07E−5	1.835 71E−5	1.794 68E−5	3.029 45E−7



(a) 4次数值模拟结果



(b) 均值及误差棒

图 5 ²³⁵U 中子角关联分布

Fig. 5 Neutron angular correlation distribution of ²³⁵U

彼得堡核物理研究所曾使用 2 个闪烁体探测器组成的符合中子测量装置去测量诱发裂变核素 ^{233}U 、 ^{235}U 以及 ^{239}Pu 的中子角关联分布情况^[5], 但只公布了仿真数据, 并未公布实验数据。为了验证测量模型的准确性, 将得到的 ^{235}U 数值模拟结果归一化后与其仿真结果进行简单比对, 结果如图 6 所示。比对结果表明, 本文所得 ^{235}U 的数值模拟结果与彼得堡核物理研究所的仿真结果重合度较高。

^{239}Pu 的数值模拟结果如表 3 所示。

根据数值模拟结果绘制裂变核素 ^{239}Pu 诱发裂变的中子角关联分布如图 7 所示。

同样地, 将得到的数值模拟结果与彼得堡核物理研究所仿真结果^[5]进行简单比对, 结果如图 8 所示。比对结果表明, 本文所得 ^{239}Pu 的数值模拟

结果与彼得堡核物理研究所的仿真结果重合度比较高。

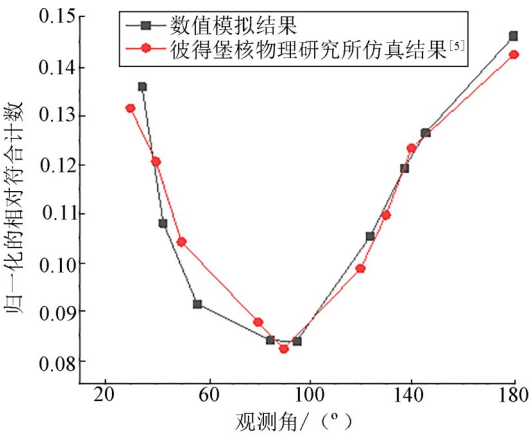


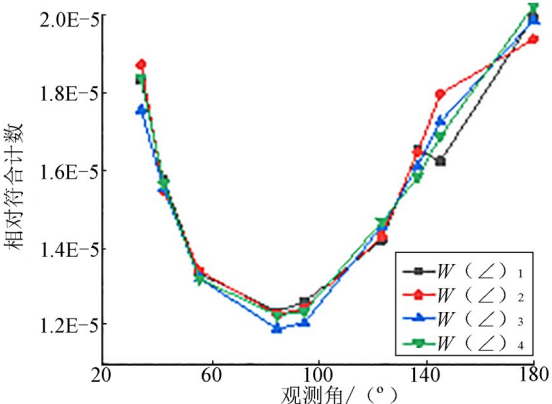
图 6 ^{235}U 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of ^{235}U

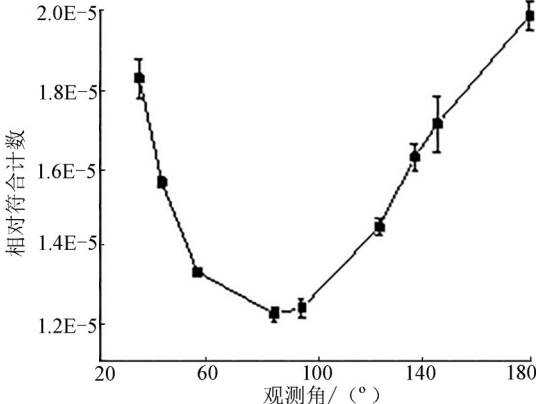
表 3 30 g ^{239}Pu 球体角群相对符合计数平均值

Tab. 3 Average values of relatively conforming counts of angular groups of 30 g ^{239}Pu spheroid

$\angle$	$W(\angle)_1$	$W(\angle)_2$	$W(\angle)_3$	$W(\angle)_4$	相对符合计数	
					均值	标准差
180.000 00	1.995 05E-5	1.939 10E-5	1.987 67E-5	2.024 60E-5	1.986 61E-5	3.546 08E-7
145.494 82	1.624 75E-5	1.798 32E-5	1.725 94E-5	1.688 36E-5	1.709 34E-5	7.254 63E-7
137.127 62	1.653 13E-5	1.647 21E-5	1.611 72E-5	1.583 53E-5	1.623 90E-5	3.253 45E-7
123.844 79	1.421 93E-5	1.431 68E-5	1.456 99E-5	1.469 40E-5	1.445 00E-5	2.197 74E-7
95.046 44	1.261 19E-5	1.245 02E-5	1.207 43E-5	1.236 97E-5	1.237 65E-5	2.252 57E-7
84.953 56	1.236 69E-5	1.229 64E-5	1.192 69E-5	1.227 90E-5	1.221 73E-5	1.972 78E-7
56.155 21	1.334 66E-5	1.342 32E-5	1.321 95E-5	1.321 59E-5	1.330 13E-5	1.014 85E-7
42.872 38	1.575 34E-5	1.547 62E-5	1.553 56E-5	1.565 78E-5	1.560 58E-5	1.240 81E-7
34.505 18	1.832 57E-5	1.873 54E-5	1.756 95E-5	1.840 16E-5	1.825 92E-5	4.927 84E-7



(a) 4次数值模拟结果



(b) 均值及误差棒

图 7 ^{239}Pu 中子角关联分布

Fig. 7 Neutron angular correlation distribution of ^{239}Pu

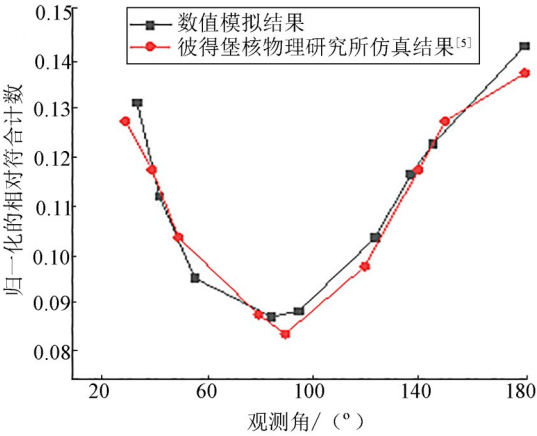


图 8 ²³⁹Pu 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of ²³⁹Pu

由以上结果可以看出，²³⁵U 和 ²³⁹Pu 这两种裂变核素在有外来中子轰击的情况下，所发射的中子具有角度关联性。通过对这两种裂变核素中子角关联分布图的绘制可以发现，在 180° 角群的相对符合计数最多，在 90° 角（95° 和 84° 之间）附近的相对符合计数最少。主要原因是裂变碎片蒸发的中子更倾向于裂变碎片运动的方向发射，而在原子核发生裂变时，为了维持系统内动量守恒，两块裂变碎片会向相反的方向分离（裂变时原子核分为两块裂变碎片的概率最大）。所以，在单次裂变过程中，产生的中子往往会向相反的方向发射，故 180° 时相对符合计数最多。而中子向垂直于裂变碎片运动的方向发射的概率最低，故在 90° 附近的相对符合计数最少。

同时，所得的裂变核素数值模拟结果与彼得堡核物理研究所的仿真结果的重合度较高，初步验证了所搭建中子角关联测量模型的准确性。

2.3 偶核核素诱发裂变数值模拟

同样对 ²³⁸U、²⁴⁰Pu 及 ²⁵²Cf 的自发裂变进行了模拟仿真。其中：3 种裂变核素的质量均设置为 30 g，形状均设置为球体；因为这 3 种裂变核素均以自发裂变为主，故设置裂变核素球体发生了 100 000 0 次自发裂变，分别进行了 4 次仿真。根据式（2）～（5），得到了 ²³⁸U、²⁴⁰Pu 及 ²⁵²Cf 在自发裂变时各角群的相对符合计数的平均值 $W(\angle)$ 。²³⁸U 的数值模拟结果如表 4 所示。

根据数值模拟结果绘制出裂变核素 ²³⁸U 自发裂变的中子角关联分布如图 9 所示。²⁴⁰Pu 的数值模拟结果如表 5 所示。裂变核素 ²⁴⁰Pu 自发裂变的中子角关联分布如图 10 所示。

密歇根大学在 2019 年搭建了一套中子角关联测量装置，如图 11（a）所示，用以对 ²⁴⁰Pu 金属板进行中子角关联的测量^[8]。该测量装置为 2 层的“井”型结构，每层有 8 个闪烁体探测器。在将得到的 ²⁴⁰Pu 数值模拟结果进行归一化处理后，与密歇根大学的实验数据进行比对，比对结果如图 11（b）所示。比对结果表明，本文所得 ²⁴⁰Pu 的数值模拟结果与密歇根大学的实验结果重合度较高。

²⁵²Cf 的数值模拟结果如表 6 所示。

根据数值模拟结果绘制出裂变核素 ²⁵²Cf 自发裂变的中子角关联分布如图 12 所示。

表 4 30 g ²³⁸U 球体角群相对符合计数平均值

Tab. 4 Average values of relatively conforming counts of angular groups of 30 g ²³⁸U spheroid

$\angle$	$W(\angle)_1$	$W(\angle)_2$	$W(\angle)_3$	$W(\angle)_4$	相对符合计数	
					均值	标准差
180.000 00	1.301 96E-6	1.299 07E-6	1.312 63E-6	1.297 78E-6	1.302 86E-6	6.745 41E-9
145.494 82	1.035 63E-6	1.051 23E-6	1.052 50E-6	1.032 22E-6	1.042 90E-6	1.046 17E-8
137.127 62	9.683 70E-7	9.652 37E-7	9.688 69E-7	9.705 97E-7	9.682 68E-7	2.234 83E-9
123.844 79	8.162 69E-7	8.236 23E-7	8.184 58E-7	8.176 20E-7	8.189 92E-7	3.216 11E-9
95.046 44	6.284 62E-7	6.209 49E-7	6.233 82E-7	6.265 80E-7	6.248 43E-7	3.337 15E-9
84.953 56	6.157 08E-7	6.241 53E-7	6.078 86E-7	6.223 79E-7	6.175 32E-7	7.387 28E-9
56.155 21	6.735 62E-7	6.742 29E-7	6.771 31E-7	6.763 78E-7	6.753 25E-7	1.700 99E-9
42.872 38	8.519 66E-7	8.562 05E-7	8.555 41E-7	8.492 89E-7	8.532 50E-7	3.230 88E-9
34.505 18	1.157 18E-6	1.138 09E-6	1.130 79E-6	1.145 18E-6	1.142 81E-6	1.123 64E-8

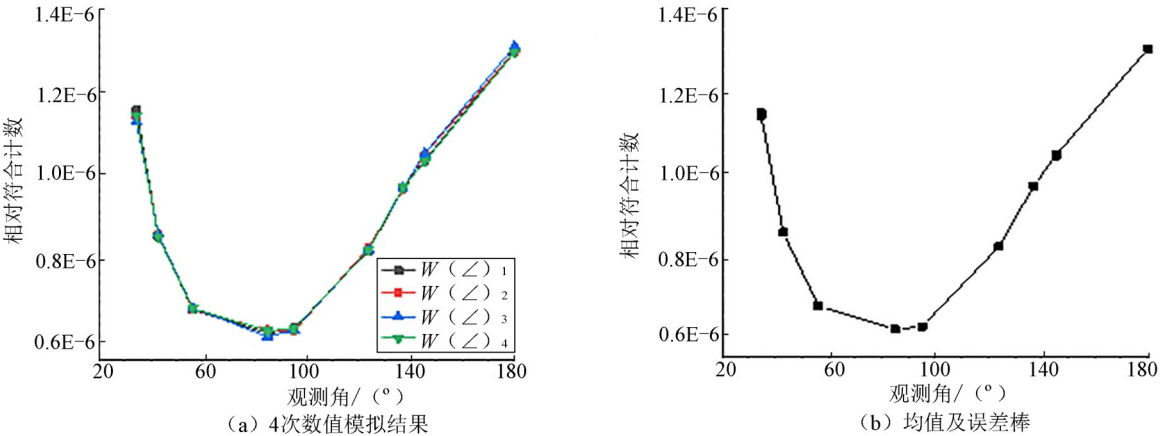


图 9 ²³⁸U 中子角关联分布
Fig. 9 Neutron angular correlation distribution of ²³⁸U

表 5 30 g ²⁴⁰Pu 球体角群相对符合计数平均值

Tab. 5 Average values of relatively conforming counts of angular groups of 30 g ²⁴⁰Pu spheroid

$\angle$	$W(\angle)_1$	$W(\angle)_2$	$W(\angle)_3$	$W(\angle)_4$	相对符合计数	
					均值	标准差
180.000 00	7.411 47E-7	7.448 10E-7	7.473 79E-7	7.528 92E-7	7.465 57E-7	4.936 98E-9
145.494 82	6.391 57E-7	6.355 14E-7	6.348 41E-7	6.348 99E-7	6.361 03E-7	2.058 62E-9
137.127 62	6.028 30E-7	5.999 67E-7	6.010 25E-7	6.131 30E-7	6.042 38E-7	6.044 82E-9
123.844 79	5.433 89E-7	5.441 33E-7	5.447 05E-7	5.495 21E-7	5.454 37E-7	2.775 62E-9
95.046 44	4.744 22E-7	4.839 23E-7	4.740 25E-7	4.828 61E-7	4.788 08E-7	5.313 57E-9
84.953 56	4.850 87E-7	4.932 54E-7	4.874 70E-7	4.822 02E-7	4.870 03E-7	4.690 72E-9
56.155 21	5.844 99E-7	5.878 65E-7	5.934 70E-7	5.928 99E-7	5.896 83E-7	4.276 47E-9
42.872 38	7.270 97E-7	7.230 64E-7	7.179 53E-7	7.255 00E-7	7.234 03E-7	3.994 07E-9
34.505 18	1.014 16E-7	1.001 94E-6	1.002 34E-6	1.003 22E-6	1.005 42E-6	5.853 36E-9

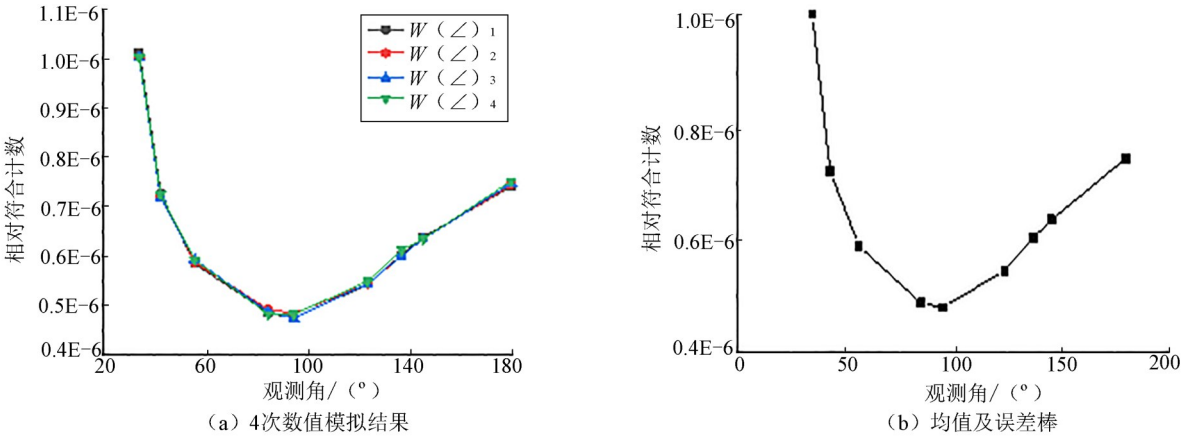


图 10 ²⁴⁰Pu 中子角关联分布
Fig. 10 Angular correlation distribution of ²⁴⁰Pu neutrons

法国斯特拉斯堡大学使用 60 个符合中子计数装置测量了核素 ²⁵²Cf 的中子角关联分布情况^[4], 所用实验装置如图 13 (a) 所示。在将本文得到的 ²⁵²Cf 数值模拟结果进行归一化处理后, 与斯特

拉斯堡大学的实验数据进行比对, 比对结果如图 13 (b) 所示。由比对结果可以看出, 本文所得 ²⁵²Cf 的数值模拟结果与斯特拉斯堡大学的实验结果重合度较高。

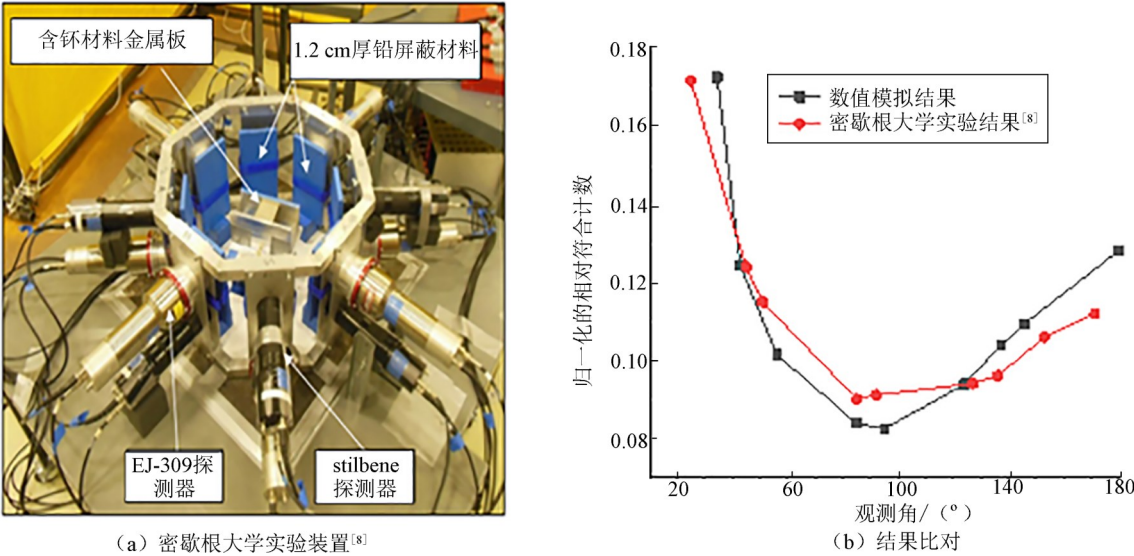


图 11 ²⁴⁰Pu 的仿真结果与实验结果对照

Fig. 11 Comparison between simulation results and experimental results of ²⁴⁰Pu

表 6 30 g ²⁵²Cf 球体角群相对符合计数平均值

Tab. 6 Average values of relatively conforming counts of angular groups of 30 g ²⁵²Cf spheroid

$\angle$	$W(\angle)_1$	$W(\angle)_2$	$W(\angle)_3$	$W(\angle)_4$	相对符合计数	
					均值	标准差
180	6.991 69E-7	7.075 29E-7	7.025 92E-7	7.093 69E-7	7.046 65E-7	4.648 71E-9
145.494 82	6.297 96E-7	6.349 82E-7	6.303 14E-7	6.286 91E-7	6.309 46E-7	2.775 04E-9
137.127 62	6.027 55E-7	6.041 85E-7	6.090 03E-7	6.052 02E-7	6.052 86E-7	2.673 18E-9
123.844 79	5.647 69E-7	5.614 74E-7	5.610 58E-7	5.607 80E-7	5.620 20E-7	1.854 29E-9
95.046 44	5.015 52E-7	5.002 38E-7	4.996 29E-7	5.037 67E-7	5.012 96E-7	1.832 10E-9
84.953 56	4.991 42E-7	4.986 80E-7	5.011 94E-7	5.012 02E-7	5.000 54E-7	1.333 71E-9
56.155 21	5.333 54E-7	5.371 47E-7	5.341 85E-7	5.340 77E-7	5.346 91E-7	1.678 53E-9
42.872 38	5.998 04E-7	5.982 41E-7	5.974 90E-7	5.979 62E-7	5.983 74E-7	1.002 22E-9
34.505 18	6.890 49E-7	6.880 58E-7	6.924 88E-7	6.918 04E-7	6.903 54E-7	2.131 57E-9

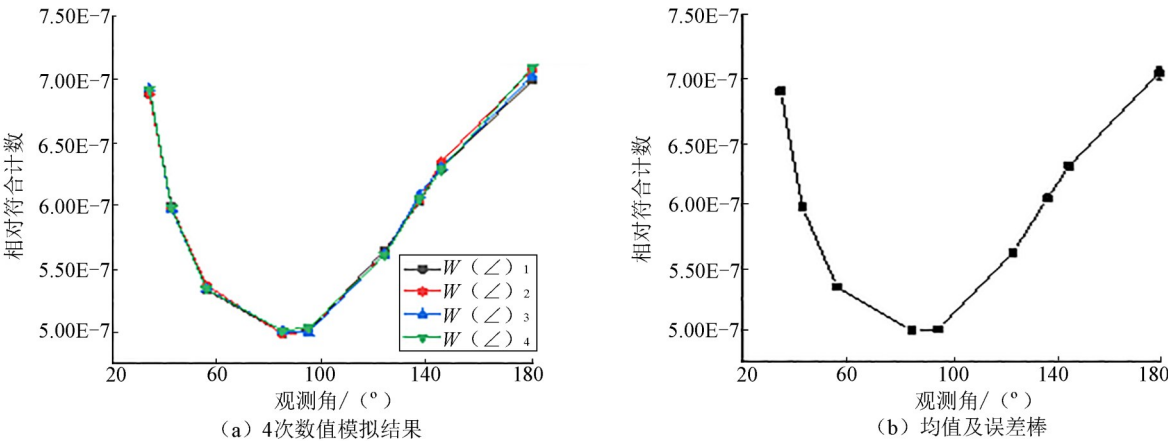
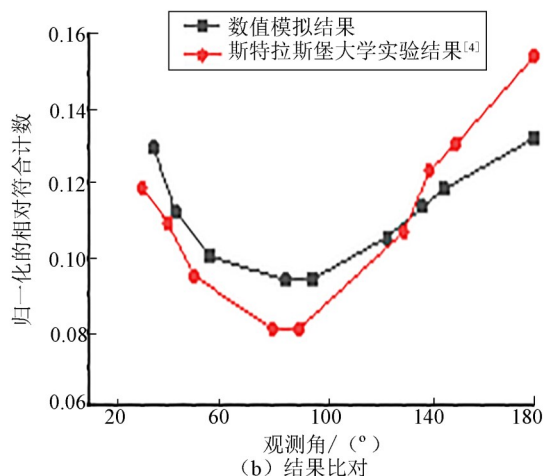


图 12 ²⁵²Cf 中子角关联分布

Fig. 12 Neutron angular correlation distributions of ²⁵²Cf

(a) 斯特拉斯堡大学实验装置^[4]

(b) 结果比对

图 13 ^{252}Cf 的仿真结果与实验结果对照Fig. 13 Comparison between simulation results and experimental results of ^{252}Cf

由以上结果可以看出, ^{238}U 、 ^{240}Pu 和 ^{252}Cf 这 3 种裂变核素在自发裂变时的相对符合计数都会随着观测角的变化而变化, 但都呈现在 180° 处相对符合计数最高而 90° 附近相对符合计数最低的趋势。同时, 所得的裂变核素数值模拟结果与密歇根大学^[8]、斯特拉斯堡大学的实验结果^[4]的重合度较高, 进一步验证了所建模型的准确性较强。

4 结论

本文利用 Geant4 软件搭建符合中子测量模型, 耦合 FREYA 数据包, 对 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 以及 ^{252}Cf 这 5 种常见的裂变核素进行了数值模拟。模拟结果表明, 裂变核素的中子角关联分布图的走向都大致相同, 在 180° 处相对符合计数最高而 90° 附近相对符合计数最低。与权威机构的中子角关联实验测量及仿真结果比对表明, 数值模拟的效果较好, 证明了所搭建测量模型的准确性以及开展相应数值模拟研究的可行性, 这对后期通过数值模拟手段研究中子角关联与泄漏增殖系数关系以及开展其他工作具有重要意义。

参考文献:

- [1] NAGY L. Neutron multiplicity counting with the analysis of continuous detector signals[D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2021: 8-10.
- [2] JANDEL M, BREDEWEG T A, BOND E M, et al. New precision measurements of the ^{235}U (n, γ) Cross Section[J]. Physical Review Letters,

2012, 109(20): 202506.

- [3] BUNAKOV V E, GUSEVA I S, KADMEN-SKY S G, et al. Angular anisotropy of neutrons evaporated from fission fragments[J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics, 2006, 70(11): 1853-1858.
- [4] CHIETERA A, STUTTGÉ L, GÖNNENWEIN F, et al. Angular correlations in the prompt neutron emission of spontaneous fission of ^{252}Cf [J]. The European Physical Journal A, 2018, 54: 1-12.
- [5] GUSEVA I S, GAGARSKI A M, SOKOLOV V E, et al. Detailed investigations of neutron neutron angular correlations in slow-neutron-induced fission of ^{233}U , ^{235}U , and ^{239}Pu [J]. Physics of Atomic Nuclei, 2018, 81: 447-454.
- [6] SIDELNIK I, ASOREY H, GUARIN N, et al. Enhancing neutron detection capabilities of a water Cherenkov detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 955: 163172.
- [7] MARCATH M J, SHIN T H, CLARKE S D, et al. Neutron angular distribution in plutonium-240 spontaneous fission[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 830: 163-169.
- [8] SHIN T H, DI FULVIO A, CLARKE S D, et al. Prompt fission neutron anisotropy in low-multiplying subcritical plutonium metal assemblies[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers,

- Detectors and Associated Equipment, 2019, 915: 110-115.
- [9] SHIN T H, BRAVO C A, MARLOW J, et al. Neutron-neutron angular and energy-angle correlations of plutonium samples with varying α -ratio[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 946: 162297.
- [10] KAWANO T, TALOU P, STETCU I, et al. Statistical and evaporation models for the neutron emission energy spectrum in the center-of-mass system from fission fragments[J]. Nuclear Physics A, 2013, 913: 51-70.
- [11] PRINGLE J S, BROOKS F D. Angular correlation of neutrons from spontaneous fission of ^{252}Cf [J]. Physical Review Letters, 1975, 35 (23) : 1563-1566.
- [12] BOWMAN H R, THOMPSON S G. J. CD Milton and W. J. Swiatecki[J]. Physical Review 1962, 126: 2120.
- [13] KAPOOR S S, RAMANNA R, RAMA RAO P N. Emission of prompt neutrons in the thermal neutron fission of ^{235}U [J]. Physical Review, 1963, 131(1): 283.
- [14] VERBEKE J M, RANDRUP J, VOGT R. Fission reaction event yield algorithm, FREYA for event-by-event simulation of fission[J]. Computer Physics Communications, 2015, 191: 178-202.
- [15] VOGT R, RANDRUP J. Event-by-event modeling of prompt neutrons and photons from neutron-induced and spontaneous fission with FREYA[J]. Nuclear Data Sheets, 2014, 118: 220-223.