

$^{239}\text{Pu}(n, f)$ 瞬发裂变中子谱预平衡不对称

中子物理导论第四次大作业

杨哲涵

司书屹

工程物理系

2024-10-29

目录

1. 引言	2
2. 实验测量和分析	5
3. 实验结论	8
4. 总结	16
5. 参考文献	19

1. 引言

预平衡预裂变中子谱的特征

瞬发中子 核裂变时,大部分的裂变中子均是一裂变就立即释出,称为瞬发中子 (**prompt fission neutron**).

实验中,测得的瞬发中子谱(**prompt fission neutron spectrum, PFNS**)包括了后裂变中子谱与预平衡中子谱.前者对应前三裂变机会,后者对应第四裂变机会.

根据理论,预平衡预裂变谱具有两个特征:

- 预平衡预裂变中子的角分布在入射中子动量的前向方向得到增强
- 预平衡预裂变中子的角分布与裂变轴 (**fission axis**)无关

这篇论文[1] 验证上述两个特征,并首次给出了角分布的实验结果,于 2019 年发表在 PRL

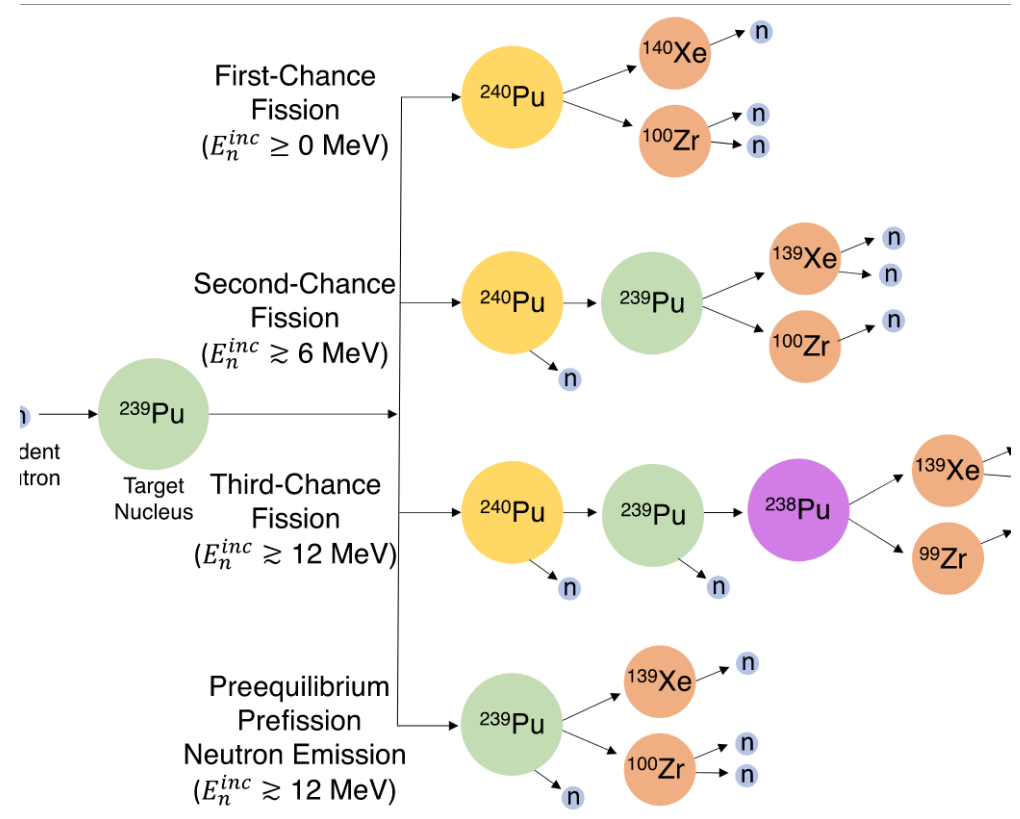


图 1 入射中子能量与反应道的关系

预平衡预裂变中子谱的特征

瞬发中子 核裂变时,大部分的裂变中子均是一裂变就立即释出,称为瞬发中子 (**prompt fission neutron**).

实验中,测得的瞬发中子谱(**prompt fission neutron spectrum, PFNS**)包括了后裂变中子谱与预平衡中子谱.前者对应前三裂变机会,后者对应第四裂变机会.

根据理论,预平衡预裂变谱具有两个特征:

- 预平衡预裂变中子的角分布在入射中子动量的前向方向得到增强
- 预平衡预裂变中子的角分布与裂变轴 (**fission axis**)无关

这篇论文[1] 验证上述两个特征,并首次给出了角分布的实验结果,于 2019 年发表在 PRL

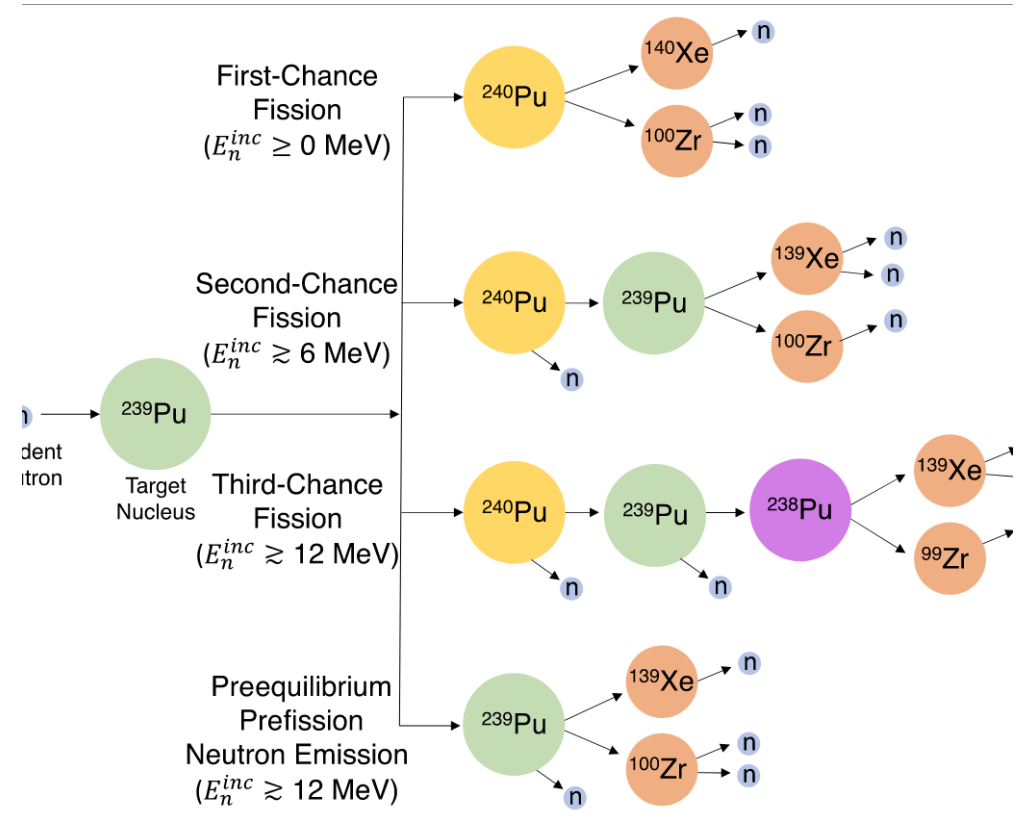


图 1 入射中子能量与反应道的关系

预平衡预裂变中子谱的特征

瞬发中子 核裂变时,大部分的裂变中子均是一裂变就立即释出,称为瞬发中子 (**prompt fission neutron**).

实验中,测得的瞬发中子谱(**prompt fission neutron spectrum, PFNS**)包括了后裂变中子谱与预平衡中子谱.前者对应前三裂变机会,后者对应第四裂变机会.

根据理论,预平衡预裂变谱具有两个特征:

- 预平衡预裂变中子的角分布在入射中子动量的前向方向得到增强
- 预平衡预裂变中子的角分布与裂变轴 (**fission axis**)无关

这篇论文[1] 验证上述两个特征,并首次给出了角分布的实验结果,于 2019 年发表在 PRL

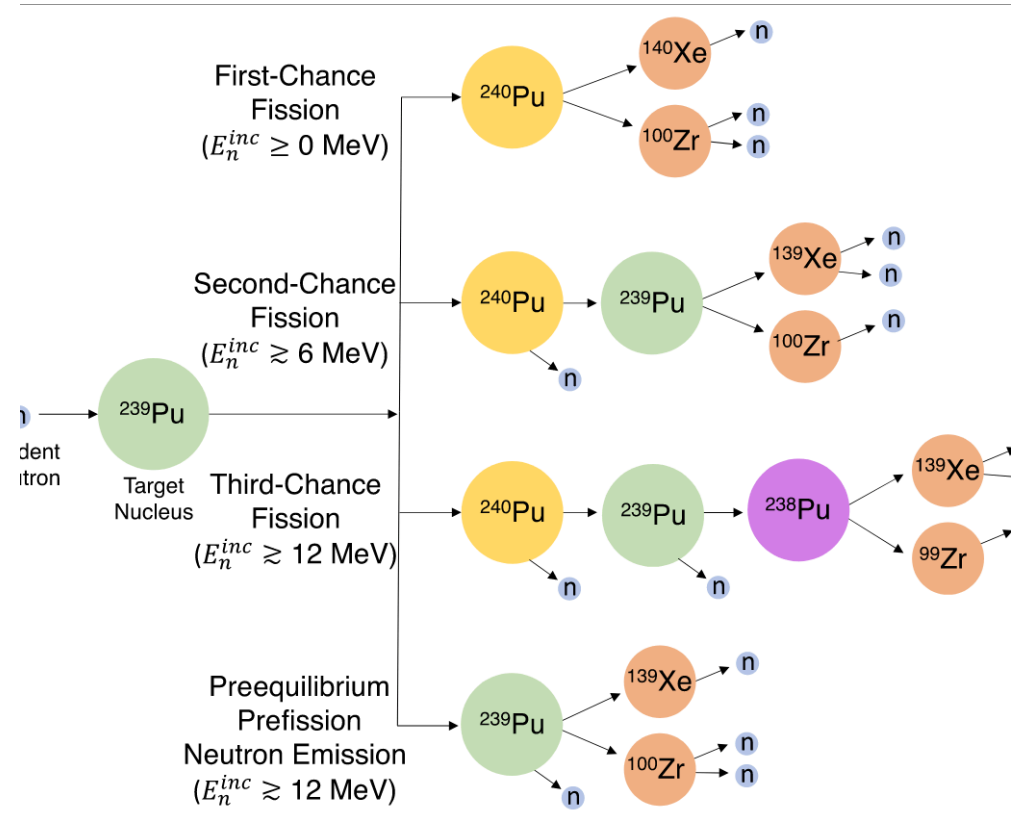


图 1 入射中子能量与反应道的关系

预平衡预裂变中子谱的特征

瞬发中子 核裂变时,大部分的裂变中子均是一裂变就立即释出,称为瞬发中子 (**prompt fission neutron**).

实验中,测得的瞬发中子谱(**prompt fission neutron spectrum, PFNS**)包括了后裂变中子谱与预平衡中子谱.前者对应前三裂变机会,后者对应第四裂变机会.

根据理论,预平衡预裂变谱具有两个特征:

- 预平衡预裂变中子的角分布在入射中子动量的前向方向得到增强
- 预平衡预裂变中子的角分布与裂变轴 (**fission axis**)无关

这篇论文[1] 验证上述两个特征,并首次给出了角分布的实验结果,于 2019 年发表在 PRL

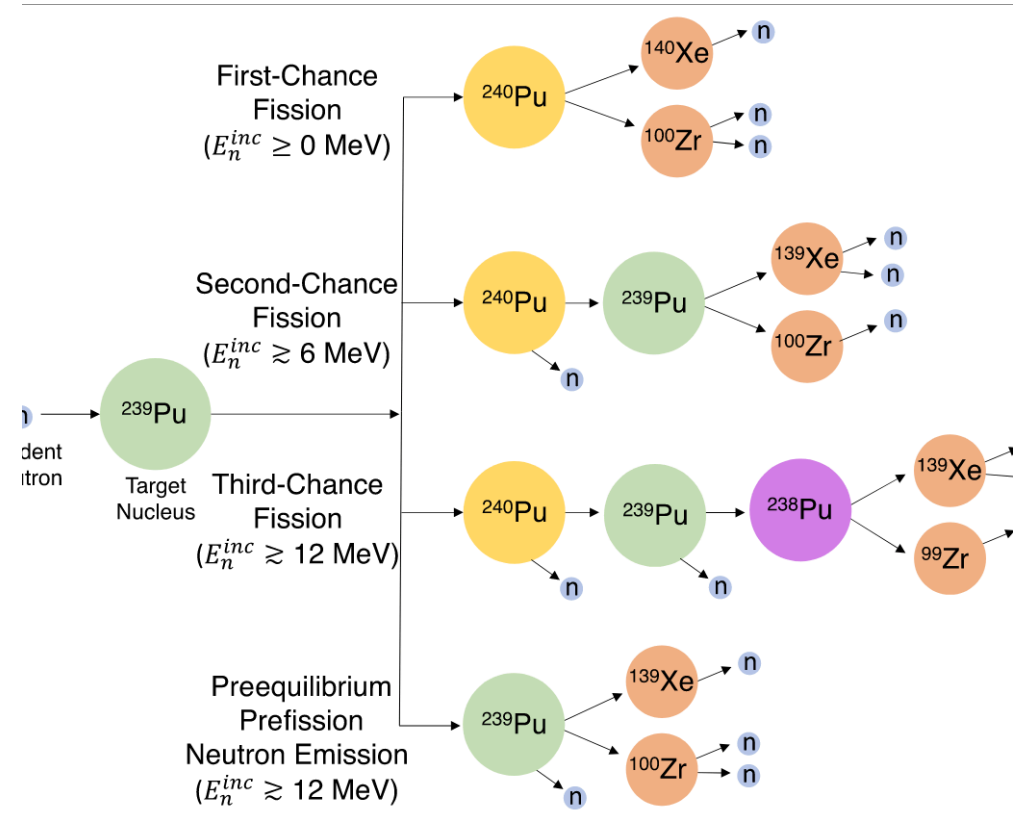


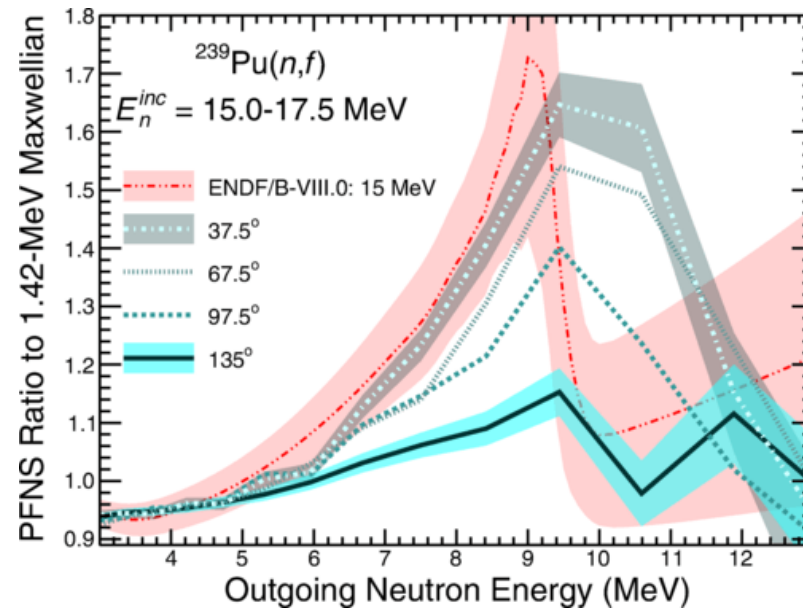
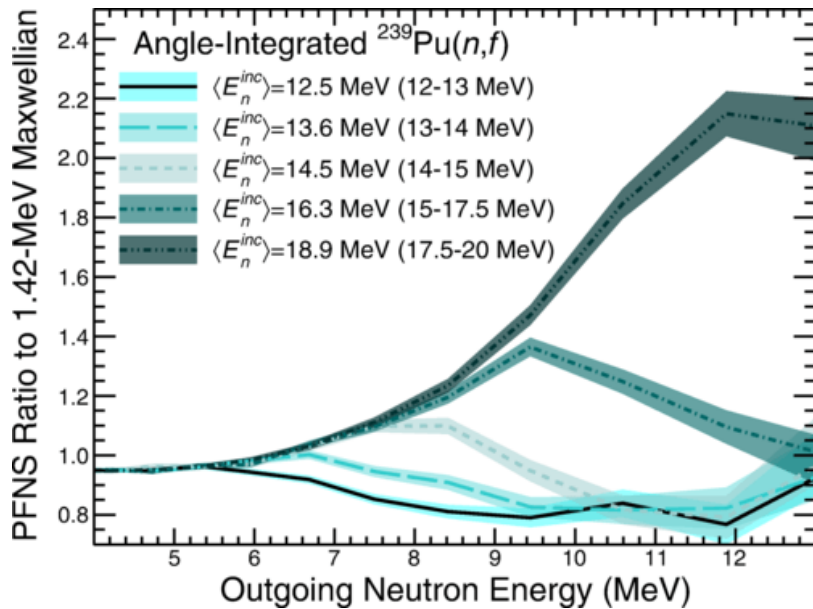
图 1 入射中子能量与反应道的关系

预裂变中子谱与能量和角度的关系

以往的实验测量了 ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U 的中子诱导裂变(**neutron induced fission**),证实了预裂变预平衡中子的存在.

然而没有人做过连续双微分测量(**continuous double-differential**),即同时以入射中子能量,出射中子能量,测量角度作为变量测量预平衡预裂变中子的角分布.

本实验[1] 首次完成这个工作,并利用 FKK 模型和 K-M 拟合方法对实验数据进行了分析.

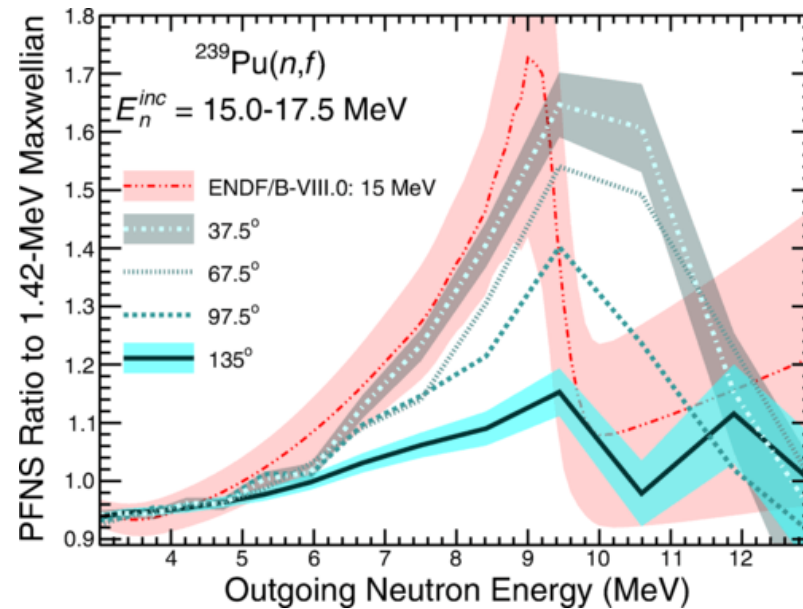
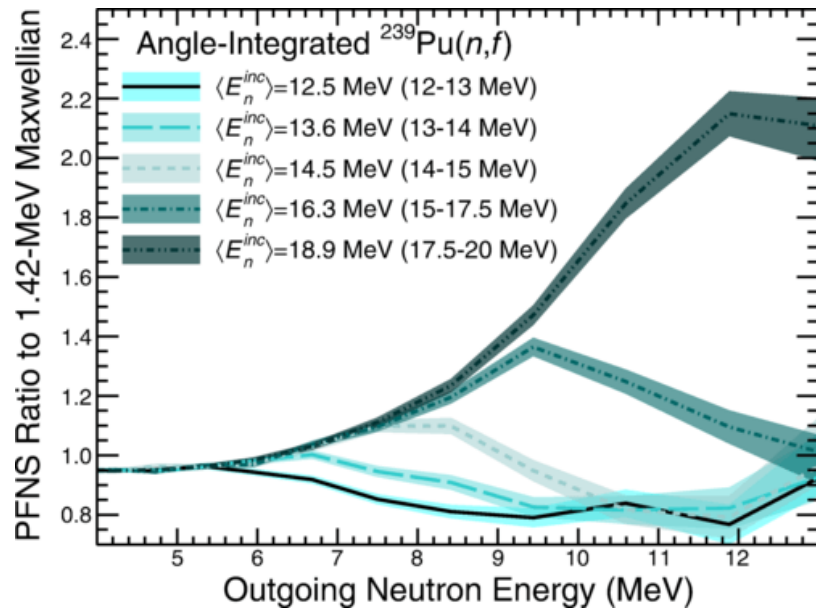


预裂变中子谱与能量和角度的关系

以往的实验测量了 ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U 的中子诱导裂变(**neutron induced fission**),证实了预裂变预平衡中子的存在.

然而没有人做过连续双微分测量(**continuous double-differential**),即同时以入射中子能量,出射中子能量,测量角度作为变量测量预平衡预裂变中子的角分布.

本实验[1] 首次完成这个工作,并利用 FKK 模型和 K-M 拟合方法对实验数据进行了分析.

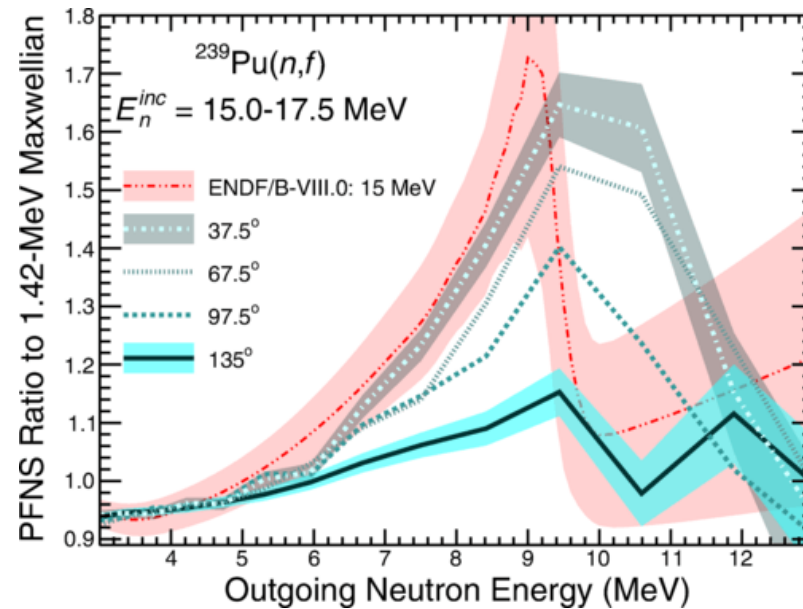
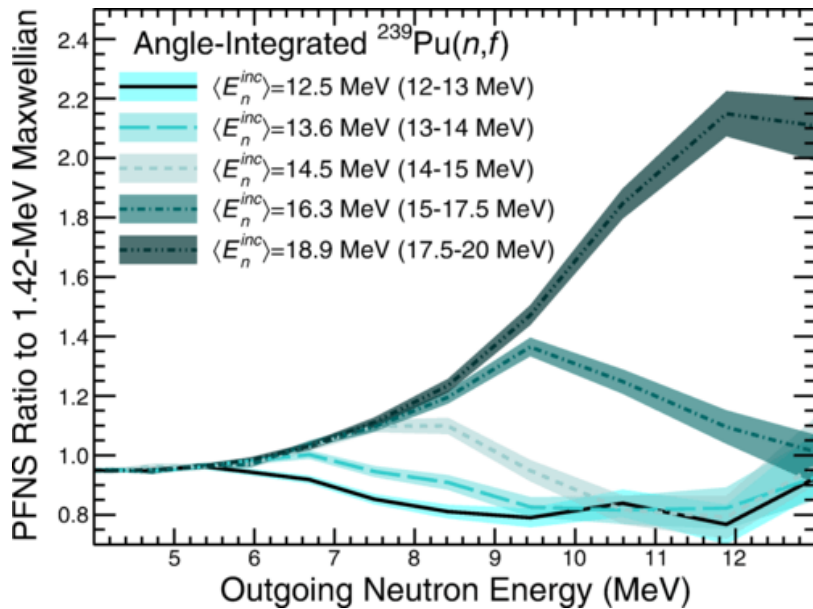


预裂变中子谱与能量和角度的关系

以往的实验测量了 ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U 的中子诱导裂变(**neutron induced fission**),证实了预裂变预平衡中子的存在.

然而没有人做过连续双微分测量(**continuous double-differential**),即同时以入射中子能量,出射中子能量,测量角度作为变量测量预平衡预裂变中子的角分布.

本实验[1] 首次完成这个工作,并利用 FKK 模型和 K-M 拟合方法对实验数据进行了分析.

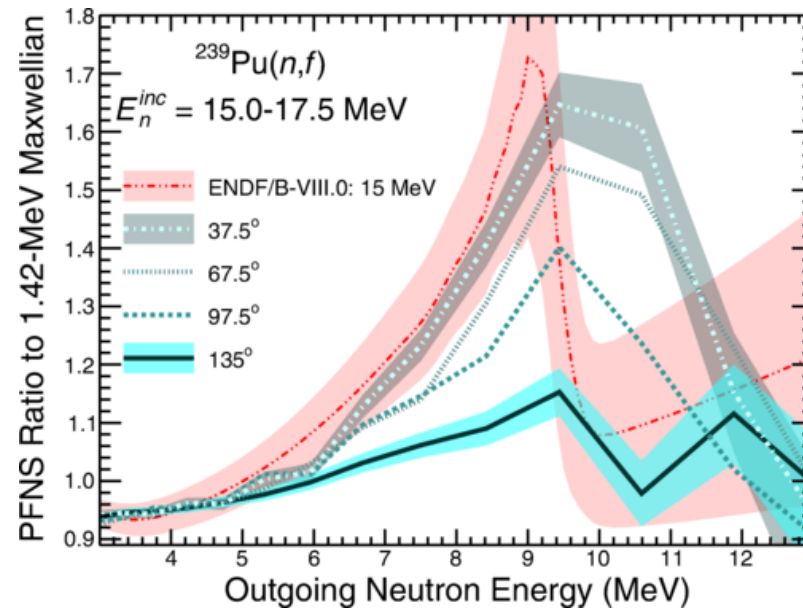
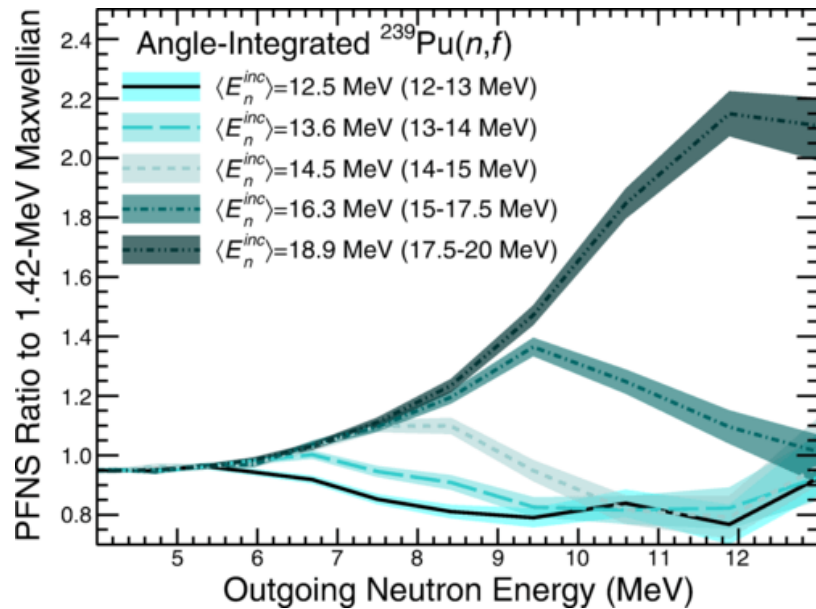


预裂变中子谱与能量和角度的关系

以往的实验测量了 ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U 的中子诱导裂变(**neutron induced fission**),证实了预裂变预平衡中子的存在.

然而没有人做过连续双微分测量(**continuous double-differential**),即同时以入射中子能量,出射中子能量,测量角度作为变量测量预平衡预裂变中子的角分布.

本实验[1] 首次完成这个工作,并利用 FKK 模型和 K-M 拟合方法对实验数据进行了分析.



2. 实验测量和分析

实验装置

Chi-Nu 实验在洛斯阿拉莫斯中子科学中心(Los Alamos Neutron Science Center at Los Alamos National Laboratory)长期运行.

Chi-Nu 实验持续多年,旨在测量中子诱发裂变中释放的中子的能量谱,完成了对主要锕系元素同位素最详细的测量和误差分析.

$^{239}\text{Pu}(n, f)$ 实验通过一组分布在半球面上的 54 个液体闪烁体探测器测量中子能谱.靶为含有锕系元素的平行板雪崩计数器.此外,所有中子都来自于标记了裂变事例的中子.

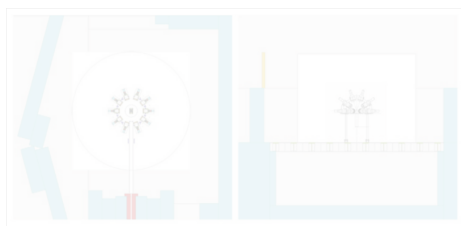


图 4 Chi-Nu LiGl 阵列和实验环境

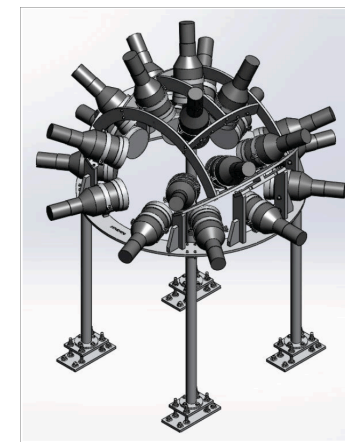


图 5 LiGl 探测器阵列

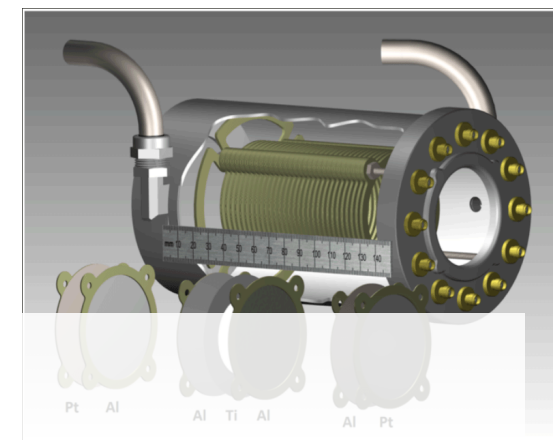


图 6 平行板雪崩计数器

实验装置

Chi-Nu 实验在洛斯阿拉莫斯中子科学中心(Los Alamos Neutron Science Center at Los Alamos National Laboratory)长期运行.

Chi-Nu 实验持续多年,旨在测量中子诱发裂变中释放的中子的能量谱,完成了对主要锕系元素同位素最详细的测量和误差分析.

$^{239}\text{Pu}(n, f)$ 实验通过一组分布在半球面上的 54 个液体闪烁体探测器测量中子能谱.靶为含有锕系元素的平行板雪崩计数器.此外,所有中子都来自于标记了裂变事例的中子.

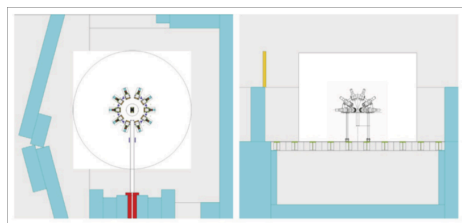


图 3 Chi-Nu LiGl 阵列和实验环境

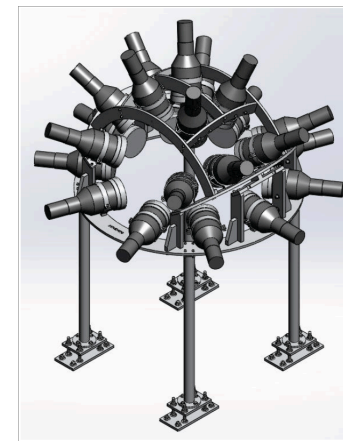


图 4 LiGl 探测器阵列

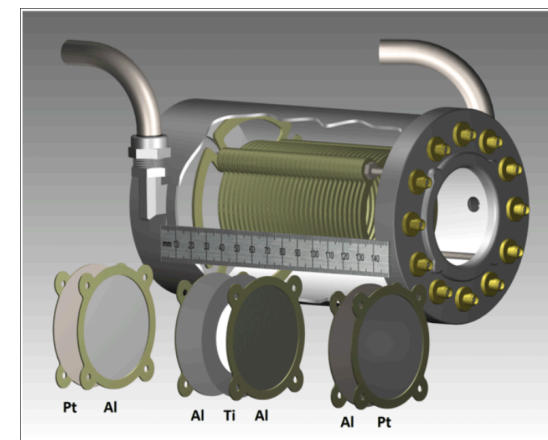


图 5 平行板雪崩计数器

实验设置

实验测量出射中子的能谱,对于入射中子能量和测量角度,选取了如下数据:

$\langle E_n^{\text{inc}} \rangle$	范围	出射角度
12.5MeV	12-13MeV	37.5°
13.6MeV	13-14MeV	67.5°
14.5MeV	14-15MeV	97.5°
16.3MeV	15-17.5MeV	135°
18.9MeV	17.5-20MeV	

根据理论,预平衡预裂变中子的出现与入射中子能量有关.

- 入射中子能量低于 12MeV,出射中子为后裂变中子,不存在预平衡预裂变中子.
- 入射中子能量高于 12MeV,预平衡预裂变中子开始产生,而且随着入射中子能量的增加,能谱的硬化将更加显著.

由于更高能量入射中子的高能尾部超过了仪器的动态范围,出射中子能量最多测到 13MeV.

实验设置

实验测量出射中子的能谱,对于入射中子能量和测量角度,选取了如下数据:

$\langle E_n^{\text{inc}} \rangle$	范围	出射角度
12.5MeV	12-13MeV	37.5°
13.6MeV	13-14MeV	67.5°
14.5MeV	14-15MeV	97.5°
16.3MeV	15-17.5MeV	135°
18.9MeV	17.5-20MeV	

根据理论,预平衡预裂变中子的出现与入射中子能量有关.

- 入射中子能量低于 12MeV,出射中子为后裂变中子,不存在预平衡预裂变中子.
- 入射中子能量高于 12MeV,预平衡预裂变中子开始产生,而且随着入射中子能量的增加,能谱的硬化将更加显著.

由于更高能量入射中子的高能尾部超过了仪器的动态范围,出射中子能量最多测到 13MeV.

实验设置

实验测量出射中子的能谱,对于入射中子能量和测量角度,选取了如下数据:

$\langle E_n^{\text{inc}} \rangle$	范围	出射角度
12.5MeV	12-13MeV	37.5°
13.6MeV	13-14MeV	67.5°
14.5MeV	14-15MeV	97.5°
16.3MeV	15-17.5MeV	135°
18.9MeV	17.5-20MeV	

根据理论,预平衡预裂变中子的出现与入射中子能量有关.

- 入射中子能量低于 12MeV,出射中子为后裂变中子,不存在预平衡预裂变中子.
- 入射中子能量高于 12MeV,预平衡预裂变中子开始产生,而且随着入射中子能量的增加,能谱的硬化将更加显著.

由于更高能量入射中子的高能尾部超过了仪器的动态范围,出射中子能量最多测到 13MeV.

3. 实验结论

预裂变不平衡与入射中子能量的关系

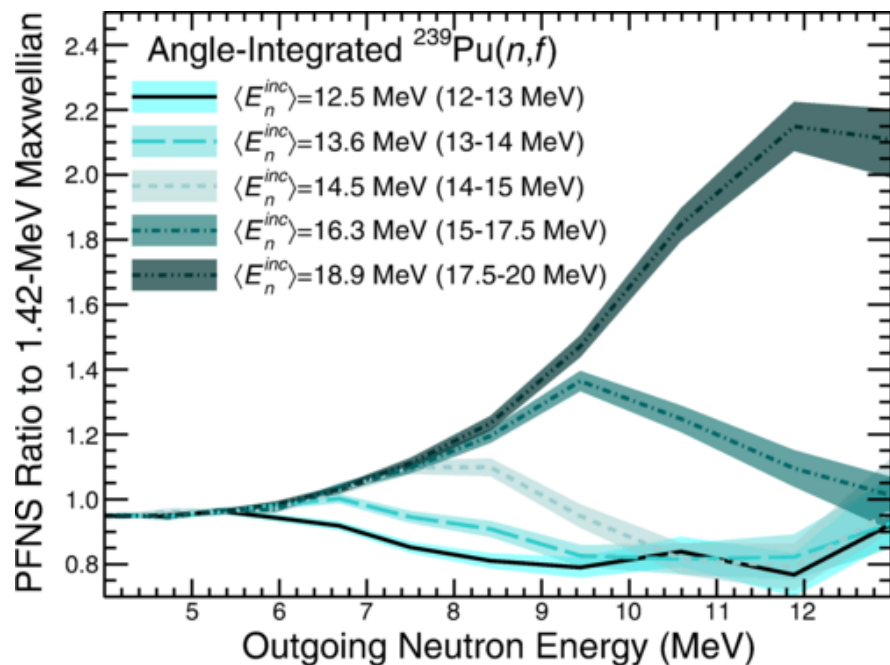


图 4 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 中子的能量依赖性

- 入射中子能量越高, 裂变能谱的峰所对应的出射中子的能量就越高
- 裂变能谱峰值比入射中子能量低大约 6MeV, 这是裂变结合能的大小

预裂变不平衡与入射中子能量的关系

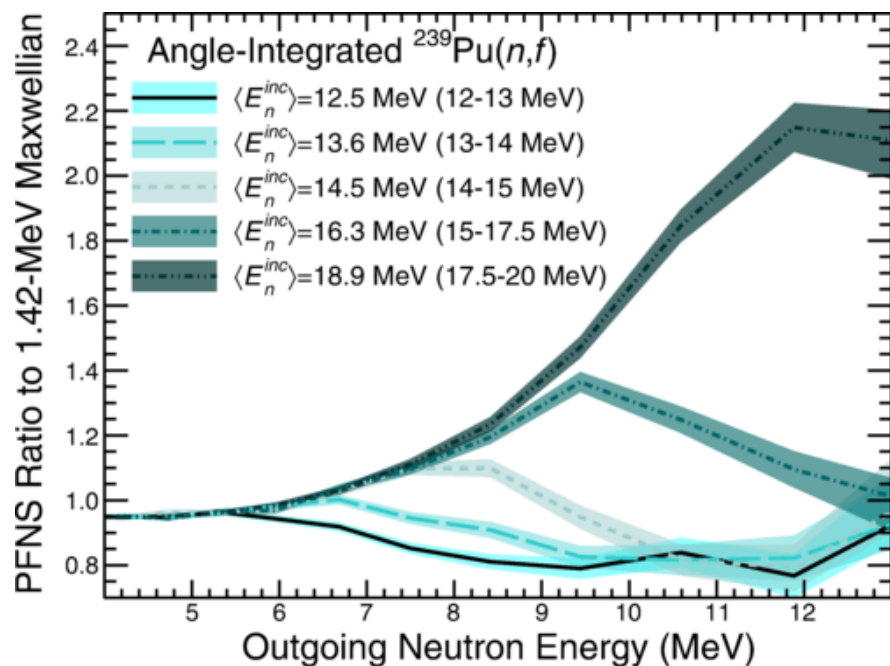


图 1 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 中子的能量依赖性

- 入射中子能量越高, 裂变能谱的峰所对应的出射中子的能量就越高
- 裂变能谱峰值比入射中子能量低大约 6MeV, 这是裂变结合能的大小

预裂变不平衡与入射中子能量的关系

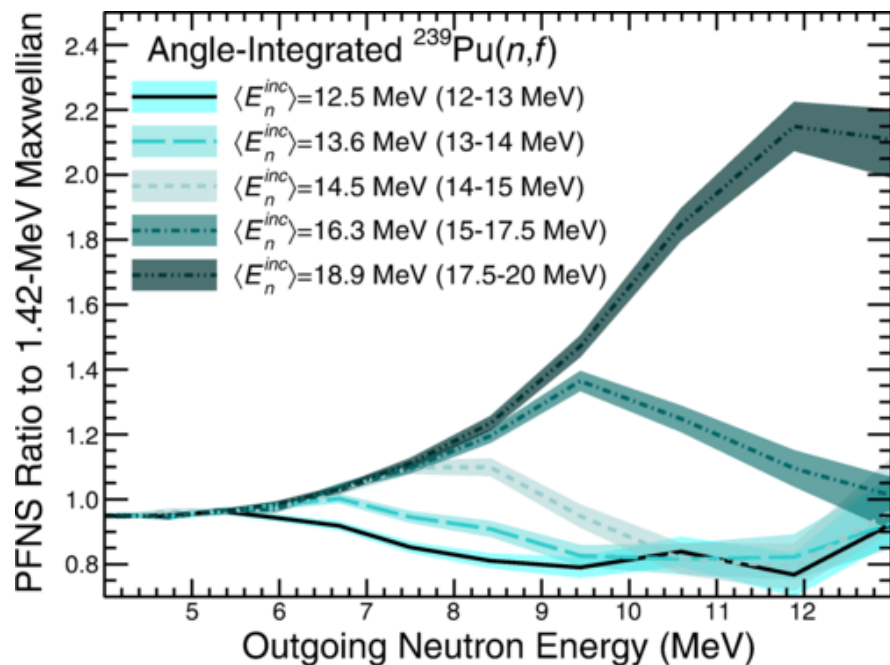


图 1 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 中子的能量依赖性

- 入射中子能量越高, 裂变能谱的峰所对应的出射中子的能量就越高
- 裂变能谱峰值比入射中子能量低大约 6MeV, 这是裂变结合能的大小

预裂变不平衡与测量角度的关系

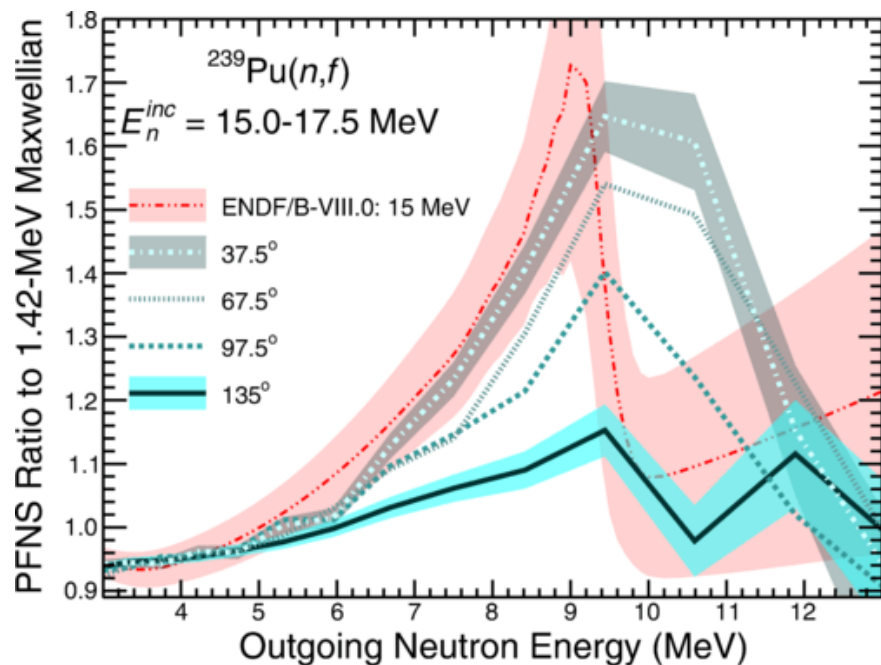


图 2 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 中子的角分布依赖性

- ENDF/B-VIII.0 的数据与角度无关,认为是所有角度平均的结果,且不同的测量角度的计数经过了缩放,让它们在 3-5MeV 的能量范围内重合.
- 出射角度越接近入射中子动量的前向方向,高能部分计数越高

预裂变不平衡与测量角度的关系

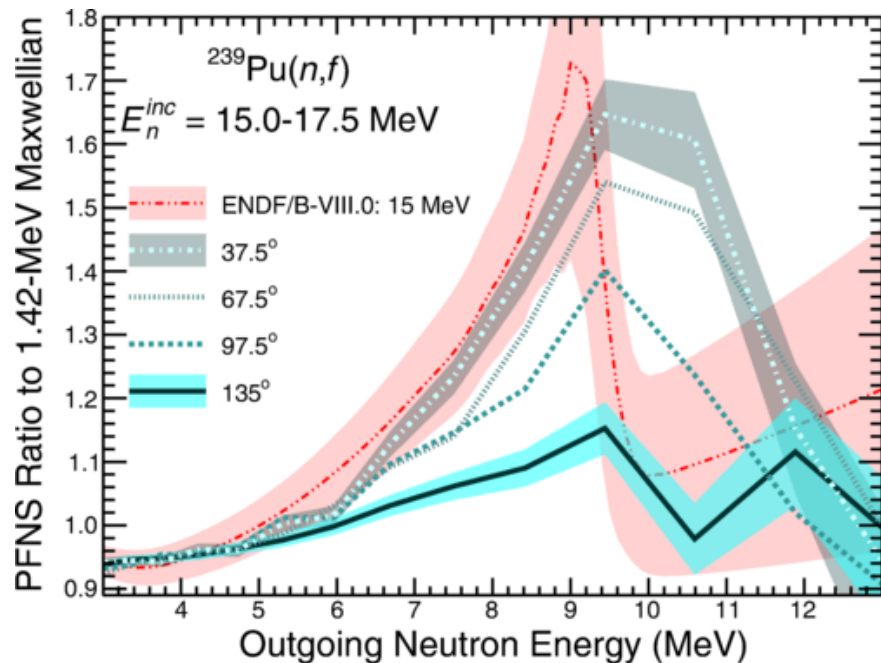


图 2 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 中子的角分布依赖性

- ENDF/B-VIII.0 的数据与角度无关,认为是所有角度平均的结果,且不同的测量角度的计数经过了缩放,让它们在 3-5MeV 的能量范围内重合.
- 出射角度越接近入射中子动量的前向方向,高能部分计数越高

预裂变不平衡与测量角度的关系

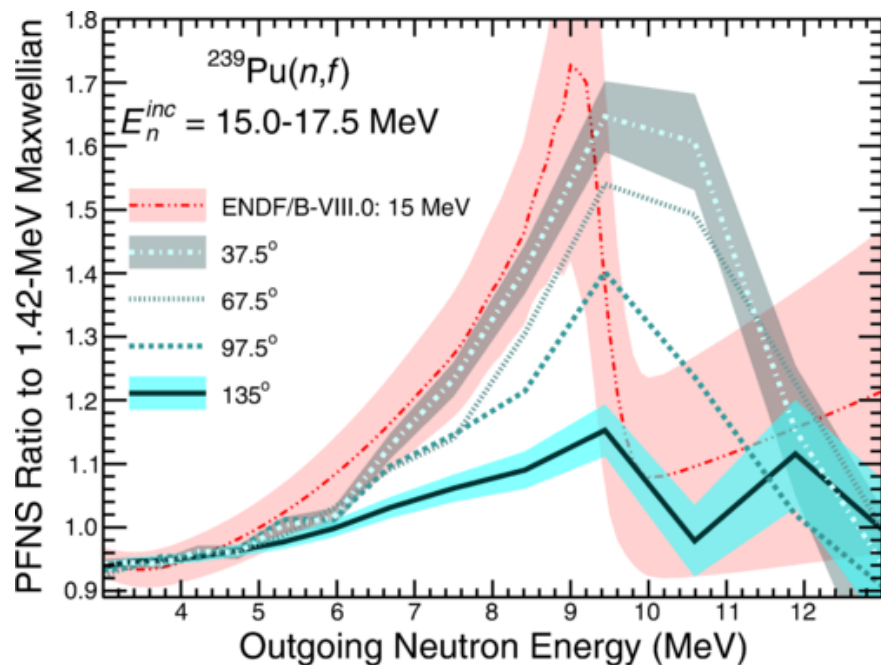


图 2 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 中子的角分布依赖性

- ENDF/B-VIII.0 的数据与角度无关,认为是所有角度平均的结果,且不同的测量角度的计数经过了缩放,让它们在 3-5MeV 的能量范围内重合.
- 出射角度越接近入射中子动量的前向方向,高能部分计数越高

预裂变不平衡的各向异性验证

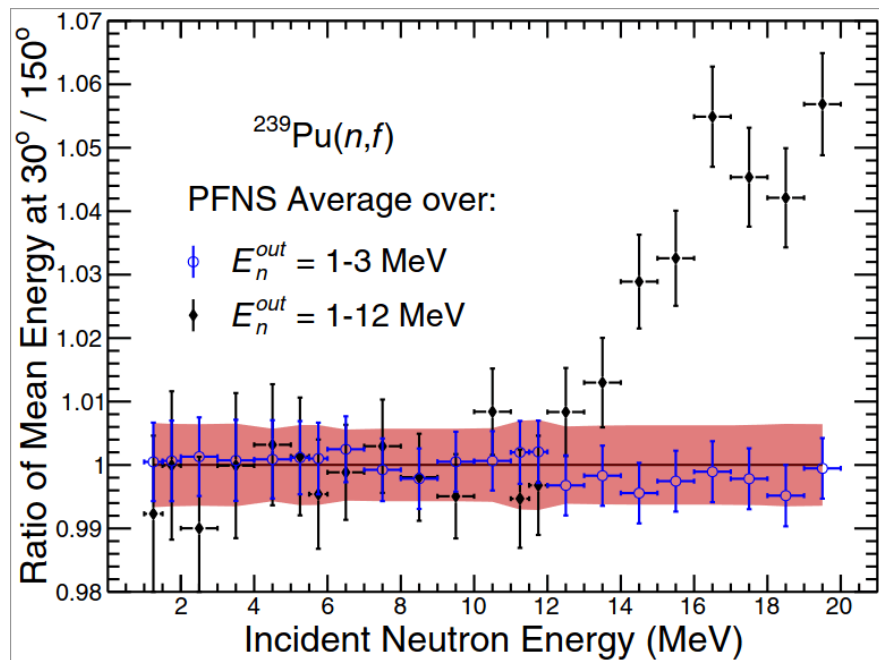


图 3 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 出射方向 $30^\circ/150^\circ$ 计数

- 1-3MeV 的出射中子主要是后裂变中子,具有高度的各向同性
- 验证了预平衡预裂变中子的各向异性,即在 30° 和 150° 方向上的计数差异
- 1-12MeV 的出射中子含有预平衡预裂变中子,在 E_n^{inc} 超过 16-17MeV 后,高能尾部计数不再增长,这是因为超过了仪器的动态范围

预裂变不平衡的各向异性验证

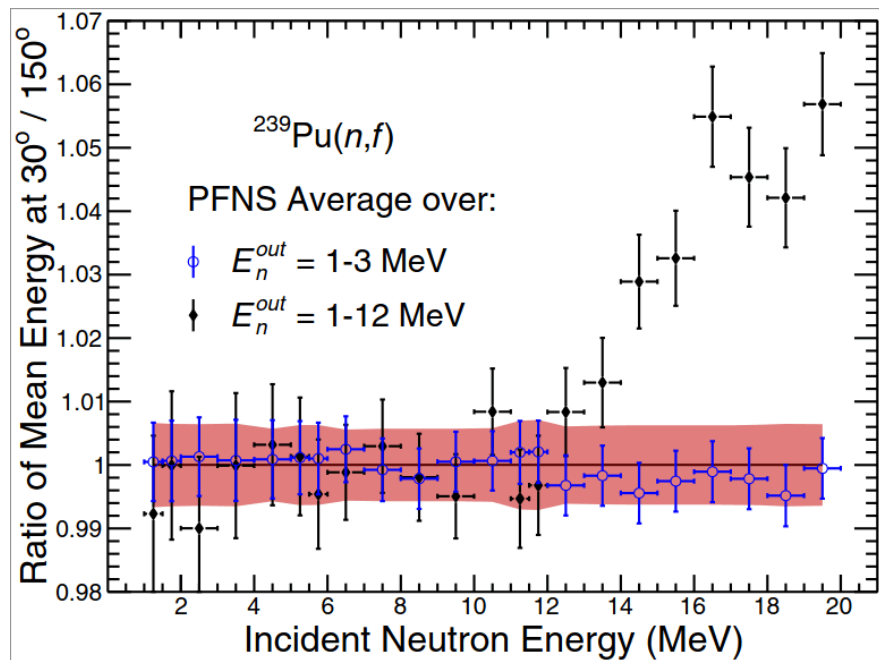


图 2 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 出射方向 $30^\circ / 150^\circ$ 计数

- 1-3MeV 的出射中子主要是后裂变中子,具有高度的各向同性
- 验证了预平衡预裂变中子的各向异性,即在 30° 和 150° 方向上的计数差异
- 1-12MeV 的出射中子含有预平衡预裂变中子,在 E_n^{inc} 超过 16-17MeV 后,高能尾部计数不再增长,这是因为超过了仪器的动态范围

预裂变不平衡的各向异性验证

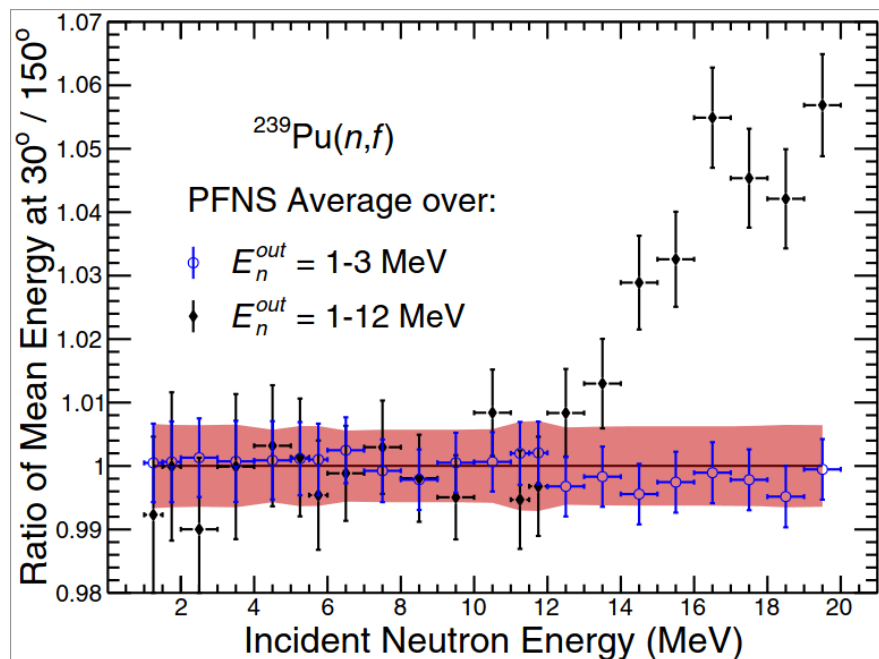


图 2 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 出射方向 $30^\circ/150^\circ$ 计数

- 1-3MeV 的出射中子主要是后裂变中子,具有高度的各向同性
- 验证了预平衡预裂变中子的各向异性,即在 30° 和 150° 方向上的计数差异
- 1-12MeV 的出射中子含有预平衡预裂变中子,在 E_n^{inc} 超过 16-17MeV 后,高能尾部计数不再增长,这是因为超过了仪器的动态范围

FKK 模型

本文依赖的理论模型是 FKK 模型(The model of Feshbach, Kerman, and Koonin)

对预裂变中子,FKK 模型的 MSD(multiple step direct)-MSC(multiple step compound)可以用来描述不同能量和不同角度的裂变截面[2]

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right)^{\text{MSC}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\pi}{k^2} \sum_J (2J + 1) 2\pi \frac{\langle \Gamma_{1J} \rangle}{\langle D_{1J} \rangle} \sum_N \sum_{\nu j} \frac{\langle \Gamma_N^{\uparrow \nu j} \rho^\nu(U) \rangle}{\langle \Gamma_{NJ} \rangle} \prod_{M=1}^{N-1} \frac{\langle \Gamma_{MJ}^\downarrow \rangle}{\langle \Gamma_{MJ} \rangle}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right)^{\text{MSD}} = \sum_\lambda \frac{2\lambda + 1}{2s_a + 1} \frac{\mu_a \mu_b}{(2\pi \hbar^2)^2} \frac{k_b}{k_a} \sum_{m m_b m_a} |T_\lambda^{m m_b m_a}(\theta)|^2 \omega(p, h, E_x) R_n(\lambda)$$

其中各参数的含义详见[2],这里使用的 FKK 模型在后面给出了理论预测

FKK 模型

本文依赖的理论模型是 FKK 模型(The model of Feshbach, Kerman, and Koonin)

对预裂变中子,FKK 模型的 MSD(multiple step direct)-MSC(multiple step compound)可以用来描述不同能量和不同角度的裂变截面[2]

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right)^{\text{MSC}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\pi}{k^2} \sum_J (2J + 1) 2\pi \frac{\langle \Gamma_{1J} \rangle}{\langle D_{1J} \rangle} \sum_N \sum_{\nu j} \frac{\langle \Gamma_N^{\uparrow \nu j} \rho^\nu(U) \rangle}{\langle \Gamma_{NJ} \rangle} \prod_{M=1}^{N-1} \frac{\langle \Gamma_M^\downarrow \rangle}{\langle \Gamma_{MJ} \rangle}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right)^{\text{MSD}} = \sum_\lambda \frac{2\lambda + 1}{2s_a + 1} \frac{\mu_a \mu_b}{(2\pi \hbar^2)^2} \frac{k_b}{k_a} \sum_{m m_b m_a} |T_\lambda^{m m_b m_a}(\theta)|^2 \omega(p, h, E_x) R_n(\lambda)$$

其中各参数的含义详见[2],这里使用的 FKK 模型在后面给出了理论预测

FKK 模型

本文依赖的理论模型是 FKK 模型(The model of Feshbach, Kerman, and Koonin)

对预裂变中子,FKK 模型的 MSD(multiple step direct)-MSC(multiple step compound)可以用来描述不同能量和不同角度的裂变截面[2]

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right)^{\text{MSC}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\pi}{k^2} \sum_J (2J + 1) 2\pi \frac{\langle \Gamma_{1J} \rangle}{\langle D_{1J} \rangle} \sum_N \sum_{\nu j} \frac{\langle \Gamma_N^{\uparrow \nu j} \rho^\nu(U) \rangle}{\langle \Gamma_{NJ} \rangle} \prod_{M=1}^{N-1} \frac{\langle \Gamma_{MJ}^\downarrow \rangle}{\langle \Gamma_{MJ} \rangle}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right)^{\text{MSD}} = \sum_\lambda \frac{2\lambda + 1}{2s_a + 1} \frac{\mu_a \mu_b}{(2\pi \hbar^2)^2} \frac{k_b}{k_a} \sum_{m m_b m_a} |T_\lambda^{m m_b m_a}(\theta)|^2 \omega(p, h, E_x) R_n(\lambda)$$

其中各参数的含义详见[2],这里使用的 FKK 模型在后面给出了理论预测

K-M 拟合

K-M(Kalbach-Mann)拟合方法是一种用于描述 MSD 和 MSC 拟合的方法[3],描述公式为

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right) = \sigma_{\text{MSD}} \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta) + \sigma_{\text{MSC}} \sum_{l=0, \Delta l=2}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta)$$

由于测量预平衡中子,所以本实验中认为 $\sigma_{\text{MSC}} = 0$,有

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right) = \sigma_{\text{MSD}} \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta)$$

由于拟合得到的 σ_{MSD} 包括真实的 MSD 截面和实验参数,所以本文没有提交 σ_{MSD} 的数值,而是只给出了拟合曲线

K-M 拟合

K-M(Kalbach-Mann)拟合方法是一种用于描述 MSD 和 MSC 拟合的方法[3],描述公式为

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right) = \sigma_{\text{MSD}} \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta) + \sigma_{\text{MSC}} \sum_{l=0, \Delta l=2}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta)$$

由于测量预平衡中子,所以本实验中认为 $\sigma_{\text{MSC}} = 0$,有

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right) = \sigma_{\text{MSD}} \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta)$$

由于拟合得到的 σ_{MSD} 包括真实的 MSD 截面和实验参数,所以本文没有提交 σ_{MSD} 的数值,而是只给出了拟合曲线

K-M 拟合

K-M(Kalbach-Mann)拟合方法是一种用于描述 MSD 和 MSC 拟合的方法[3],描述公式为

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right) = \sigma_{\text{MSD}} \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta) + \sigma_{\text{MSC}} \sum_{l=0, \Delta l=2}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta)$$

由于测量预平衡中子,所以本实验中认为 $\sigma_{\text{MSC}} = 0$,有

$$\left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \Omega \partial E} \right) = \sigma_{\text{MSD}} \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} b_l P_l(\cos \theta)$$

由于拟合得到的 σ_{MSD} 包括真实的 MSD 截面和实验参数,所以本文没有提交 σ_{MSD} 的数值,而是只给出了拟合曲线

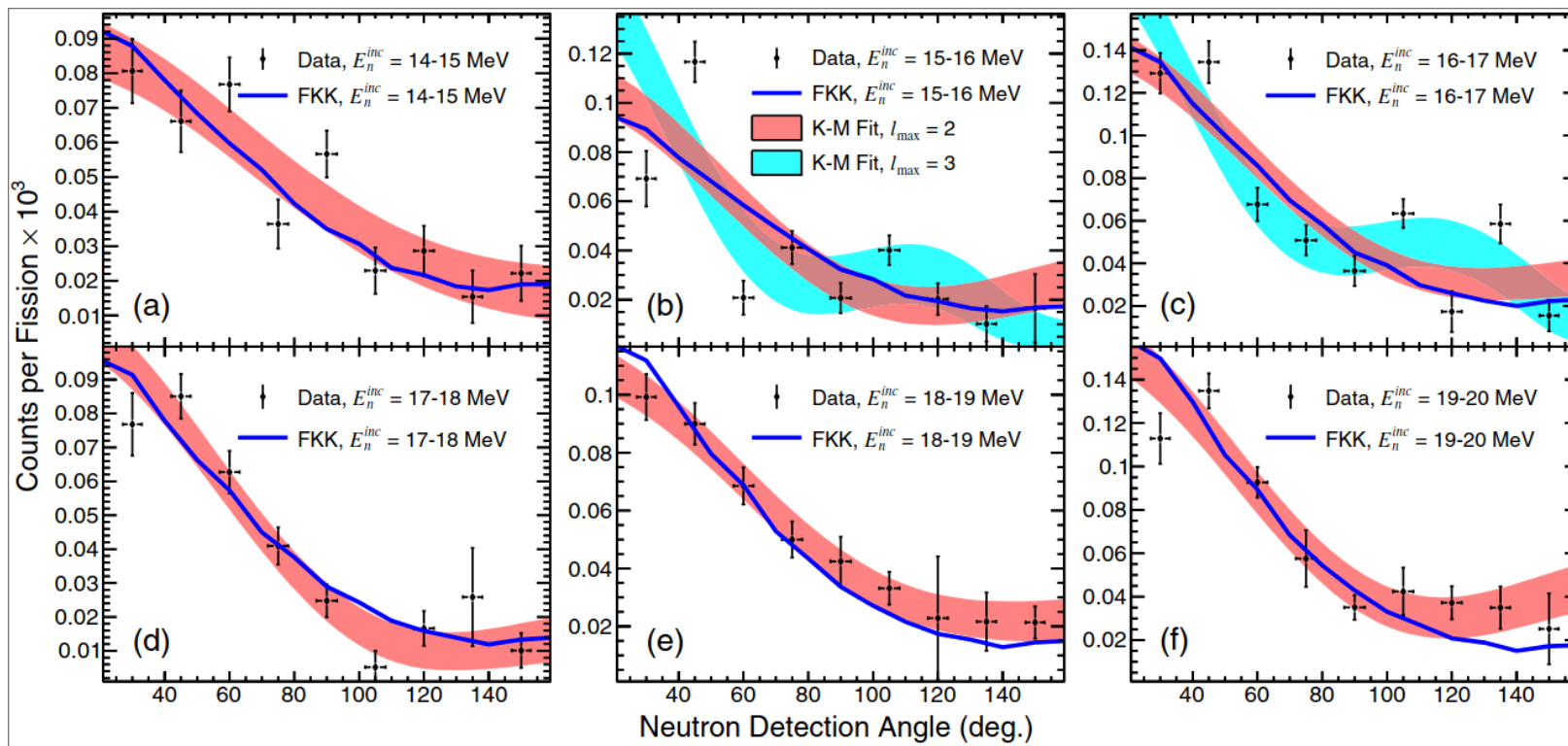


图 1 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 的角分布实验数据与拟合分析

在 PFNS 谱中将预平衡预裂变中子从后裂变中子本底中分离出来之后,利用 MCNP6 对
中子探测效率和环境散射进行了修正,得到图 1 展示的结果

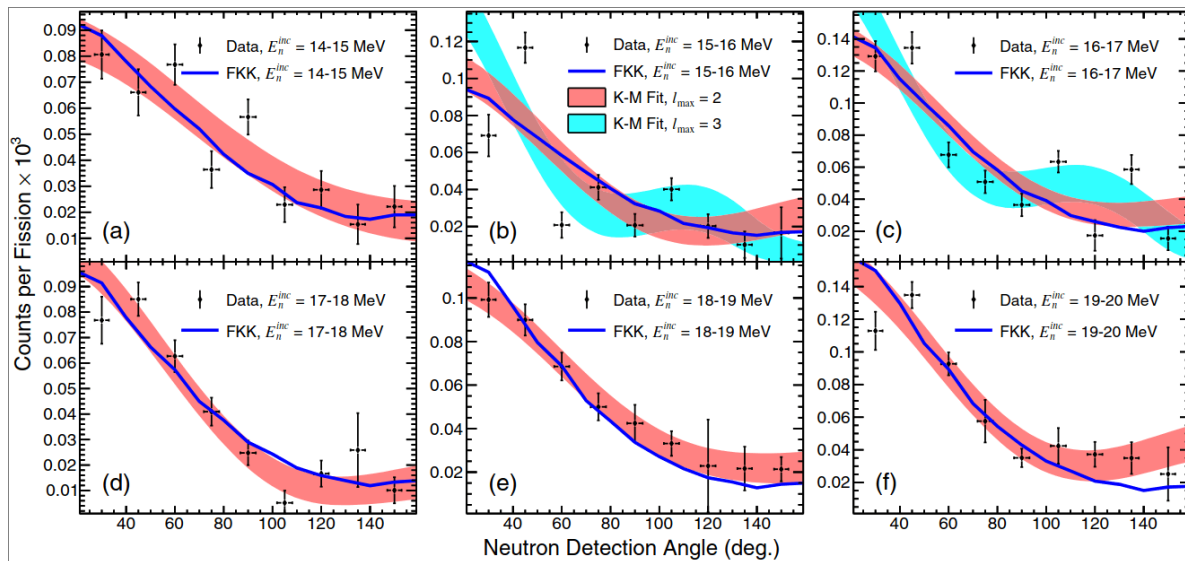


图 2 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 的角分布实验数据与拟合分析

- K-M 方法能够很好地拟合据的角分布特性,适合描述预裂变预平衡中子的角分布
- FKK 模型的估计值在这里没有给出绝对截面,因此给出的曲线是缩放过的.FKK 模型与实验结果符合得很好,证实了预平衡预裂变中子与裂变轴(**fission axis**)无关

贡献 准确测了预裂变中子的角分布,未来的裂变模型需要符合这一实验结果

4. 总结

贡献

- 为了建立更全面完整的中子诱发核裂变模型, 需要严谨地测量出射中子的能谱和角分布等性质并细化区分
- 针对出射中子束流的角分布, 以往的理论模型预测不能令人满意. 例如
 - 激子模型(**exciton model**)仅适用于预测能量分布, 对角分布无能为力
 - FKK 模型采用了简化假设, 其实用性有待进一步验证
- 因此, 基于双微分测量方法给出具体的角分布数据, 对于理论模型的验证和完善具有重要意义
- 本实验通过调节入射中子束流的能量和测量角度, 测量瞬发中子谱并进行中子计数, 从多个角度验证了预平衡预裂变中子的性质, 尤其关注
 - 角分布的各向异性: 分布在入射中子动量的前向方向得到增强, 且与裂变轴无关
 - 能量分布的“硬化(**harder**)”: 随着入射中子能量的增加, 预平衡预裂变中子的平均能量有所上升
- 此外, 本实验结合了 FKK 模型和 K-M 拟合方法, 对实验数据进行了分析, 为理论模型的验证提供了重要的数据支持

相关研究

- 2024 年,洛斯阿拉莫斯国家实验室和劳伦斯利弗莫尔国家实验室合作,对 $^{240}\text{Pu}(sf)$ 和 $^{240}\text{Pu}(n, f)$ 测量了更精确的瞬发裂变谱[4]
- 2023 年, $^{240}\text{Pu}(n, f)$ 预裂变中子的各向异性[5]
- 2020 年,1-20MeV 中子诱导 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 的 10K-10MeV 瞬发裂变谱[6]

5. 参考文献

- [1] K. J. Kelly et al., Preequilibrium Asymmetries in the $^{239}\text{Pu}(n,f)$ Prompt Fission Neutron Spectrum, Physical Review Letters **122**, 72503 (2019)
- [2] T. Kawano, T. Ohsawa, M. Baba, and T. Nakagawa, Effect of the preequilibrium process upon fast neutron fission spectra from ^{238}U , Physical Review C **63**, 34601 (2001)
- [3] C. Kalbach and F. M. Mann, Phenomenology of continuum angular distributions. I. Systematics and parametrization, Physical Review C **23**, 112 (1981)
- [4] K. J. Kelly et al., Measurement of the prompt fission neutron spectrum from 800 keV to 10 MeV for $^{240}\text{Pu}(sf)$ and for the $^{240}\text{Pu}(n, f)$ reaction induced by neutrons of energy from 1–20 MeV, Physical Review C **109**, 64611 (2024)
- [5] V. M. Maslov, Anisotropy of Prompt Fission Neutron Spectra of $^{239}\text{Pu}(n, F)$ and $^{235}\text{U}(n, F)$, Phys. Part. Nucl. Lett. **20**, 1373 (2023)

- [6] K. J. Kelly and others, Measurement of the Pu239(n,f) prompt fission neutron spectrum from 10 keV to 10 MeV induced by neutrons of energy 1–20 MeV, Phys. Rev. C **102**, 34615 (2020)