

科学技术成果报告

快中子在 ^{239}Pu 核上散射截面实验数据编评

施 兆 民

(北京大学技术物理系)

核 数 据 编 辑 组

一九七九年八月

快中子在 ^{239}Pu 核上散射截面实验数据编评

摘 要

本文评价了 0.001—20MeV 能区, 中子在 ^{239}Pu 核上的散射截面实验数据, 并对弹性散射角分布实验数据按勒让德展开系数作了推荐。

一、引 言

本报告所评价的散射截面的入射中子能量为 1keV—20MeV。

中子在 ^{239}Pu 核上的散射截面数据, 对于反应堆设计是很重要的, 在理论上也很有意义, 但到目前为止, 对于散射截面数据测量较少, 而且能区不全。主要原因: 1) ^{239}Pu 核密集的能级结构(图1), 及裂变中子所引起的复杂性, 使测量散射中子发生困难, 尤其是对非弹性散射中子的测量困难更大; 2) ^{239}Pu 样品制作的困难; 3) 实验技术上要获得品质优良的单能中子源、高分辨、高效率的探测器, 及低本底条件等困难。

由于这些原因, 所测得的散射截面的误差也很大, 一般均在约 10%, 对于 σ_{el} 达 30%以上。因此, 现在国外推荐的快中子散射截面数据主要是理论计算的结果。

二、弹性散射微分截面的评价

国内收集到的实验数据仅六家。

1. 各家数据评价

(1) 1956 年美国 R. C. Allen^[1, 2], 用含氢正比计数管在 25°—130°等九个角度测量了 0.5, 1MeV 单能中子在 ^{239}Pu 核上弹性散射微分截面。对测量结果进行了多次散射, 束流衰减, 探测器效率, 裂变中子, 本底等校正。测量中采用甄别阈去掉非弹性散射中子, 所采用的甄别阈为入射中子能量的 85%。因此, 对于 0.5, 1MeV 入射中子所测得的弹性散射中子包括了 $0 > Q > -75\text{keV}$, $0 > Q > -150\text{keV}$ 能级上散射的非弹性散射中子。

Allen 的测量方法较陈旧, 测得结果误差较大达 8—30%, 但在其所标误差范围内, 数据还是可信的, 所测得数据见表 1。

(2) 1959 年美国 Cranberg,^[3-6]用飞行时间法在 20°—160°等十五个角度测量了 0.55, 0.98, 2MeV 单能中子在 ^{239}Pu 核上弹性散射微分截面。对测量结果进行了本底, 裂变中子, 多次散射, 束流衰减, 探测器效率等校正, 与 n-p 散射比较而得到弹性散射微分截面的绝对值。本测量分辨率较差, 对于 0.55, 0.98, 2.0MeV 入射中子, 包括了 $0 > Q > -90\text{keV}$, $0 > Q > -150\text{keV}$, $0 > Q > -500\text{keV}$ 能级上之非弹性散射中子。测得结果的统计误差在小角度为 1%, 在大角度为 ~10%。作者曾对 ^{235}U 两个不同厚度样品进行测量, 所得结果重复较好, 这表明作者对多次散射束流衰减校正仔细, 测量系统稳定。所测得数据见表 2。

(3) 1969 年英国 R. Batchelor 和 J. H. Anelerson 等人^[7, 8]用飞行时间法在 30°—135°

等九个角度测量了2,3,4MeV单能中子在 ^{239}Pu 核上弹散微分截面。对测量结果进行了本底,裂变中子,探测器效率,束流衰减等校正,与n-p散射截面比较而定出弹散微分截面绝对值,本测量的分辨较差,对于2,3,4MeV入射中子,包括了从 $0 > Q > -500\text{keV}$, $0 > Q > -700\text{keV}$, $0 > Q > -1.2\text{MeV}$ 能级上的非弹散中子。测得结果的误差在小角度约为6%,在大角度约为100%。而且本测量未进行多次散射校正,对于2MeV入射中子所测得裂变谱也偏硬,因此测量结果系统误差不小。所测得数据见表3。

(4) 1969年Knitter等^[10]用飞行时间法,在 25° — 147° 等十个角度测量了0.19,0.24,0.29,0.34,0.38MeV等五种单能中子在 ^{239}Pu 核上弹性散射微分截面。对测量结果进行了本底,裂变中子,探测器效率,束流衰减,多次散射,样品盒等校正,与n-p散射截面比较而得到弹散微分截面的绝对值。所测得的弹性散射中子包括了从 $0 > Q > -76\text{keV}$ 能级上的非弹散中子,测得结果的误差为 $\sim 7\%$ 。本测量不仅采用了先进的飞行时间法,而且采用了中子同步探测器^[10],其甄别阈可低达40keV,故可测低能散射中子。另外,测量时对探测器屏蔽好,对裂变和 γ 本底,中子探测器效率等测量也很仔细,对中子相对通量也采用飞行时间法监测。因此Knitter的测量结果准确,数据可靠。Knitter将测得结果用Legendre多项式拟合:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \sum_{L=0}^4 B_L P_L(\cos\theta)$$

所发表的数据,就是拟合所得的 B_L 值。我们从他所发表的图形中,读得弹性散射微分截面原始数据见表4。

(5) 1970年Coppola等^[11],用飞行时间法在 25° — 148° 等11个角度测量了1.5,1.9,2.3,4.0,4.5,5.0,5.5MeV等单能中子在 ^{239}Pu 核上弹性散射微分截面。对测量结果进行了本底,束流衰减,多次散射,裂变中子,样品盒,探测器效率等校正,与n-p散射截面比较而得到弹散微分截面的绝对值。所测的弹散中子,对于1.5—2.3MeV入射中子包括了从 $0 > Q > -300\text{keV}$ 能级上散射的非弹散中子,对于4.0—5.5MeV入射中子包括了从 $0 > Q > -1\text{MeV}$ 能级上散射的非弹性散射中子。所测得弹性散射截面误差为约8%。Coppola的测量中采用三个探测器在三个不同角度同时进行测量,这样减少了系统误差提高测量精度。另外,探头屏蔽好,用飞行时间法进行中子通量监测,各项校正也作的仔细。所以Coppola测得的结果准确,数据可靠。但是Coppola测量的角度间隔较大,因此不能很好反映角分布情况。所测得数据见表5,表6。

(6) 1972年美国Kammerdiener等^[12]采用环状几何,用飞行时间法在 25° — 145° 等19个角度测量了14MeV中子在 ^{239}Pu 核上弹性散射微分截面。对测量结果进行了本底,探测器效率,中子源不对称性,束流衰减,多次散射等校正。所测得的弹性散射中子中包括了从 $0 > Q > -0.50\text{MeV}$ 能级上的非弹性散射中子。测得结果的统计误差又用蒙特卡洛法校正,标准误差之和为10%。本测量由于对探测器效率进行了校正,中子源能量各向异性,但未对样品盒进行校正,故引起了系统误差。但是Kammerdiener的测量,能量分辨高(中子飞行路程8.31米,分辨时间1.5ns),测量的散射能谱宽,束流强,由于采用环状样品散射强度也大,故测量的统计精度高,各项校正也考虑得仔细。用本装置测量了14MeV中子在碳上弹性散射微分截面与Nakada^[13], Bouchez^[14]等人测量符合极好,表明测量系统及各

项校正可靠。因此,我们认为 Kammerdiener 的测量是较好的。测量数据用图形发表,我们由图读得数据见表 7。

1973 年美国 Smith^[115] 测量了 0.3—1.5MeV 入射中子在 ^{239}Pu 上弹性散射微分截面,但未发表数据。

2. 推荐数据

上述六家数据中, Batchelor 的 2, 3, 4MeV 中子弹性散射微分截面的测量结果,由于未进行多次散射校正,而且 2MeV 入射中子时所测得的裂变谱偏硬,故有较大的系统误差,而且在大角度时作者所标的误差也太大(有的达 100%)。因此我们不推荐他的数据。其余五家数据,由上述评价可知,无大的系统误差,在他们所标的误差范围内数据可信。所以我们采用这五家数据为推荐值,原始测量数据见表 1, 2, 4, 5, 6, 7。

这些数据均为实验室系中的数据,我们先将其转变为质心系数据,然后用 Legendre 多项式以

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\sigma_{nn}}{4\pi} \sum_{l=0}^L (2l+1) F_l P_l(\cos\theta_{cm})$$

进行加权的最小二乘法拟合,求得 σ_{nn} , F_l 。权取为弹性散射微分截面误差平方倒数。

由于实验测量困难,所测得的角分布数据一般均是 25° — 150° 角度内之数据,对于入射能量较高的中子,向前散射份额较大。因此我们在拟合时,对于 $E_n > 1\text{MeV}$ 之数据,均补充用光学模型计算出的大小角度数据^[16]。而对于 $E_n \leq 1\text{MeV}$ 时,这种影响不大,因此我们在拟合时只采用了实验数据。

拟合时 L 选取的原则是:设参加拟合的角分布点数为 N ,则可选取的最大拟合节数 $L_{max} = N - 2$,在可选取的 L_{max} 内,选取拟合结果均方根差 S 小, ΔF_l 合理,能量相近时节数相同,且拟合值在 0 — 180° 内不出现负值的 L 为拟合节数。

计算所得的 F_l 值及其标准偏差 ΔF_l 见表 8。这就是我们推荐的 F_l 系数值。拟合值与实测值的比较见图 2—19。

3. 推荐数据与现代编评数据比较:

我们所推荐的原始数据,在较新文献[17—22]中均予以推荐,我们所推荐的 F_l 系数与文献[17—22]中所推荐的 F_l 系数也大致符合,在高节数之 F_l 相差较大,表 9 列出了 $E_n = 4.0\text{MeV}$ 时,我们推荐的 F_l 值与文献[18,21,22]推荐的 F_l 值的比较,产生差别的主要原因是,我们的 F_l 系数基本上是由实验数据拟合而得,文献[18,21,22]中之 F_l 系数是由理论计算而得。

三、去弹性散射截面的评价

我们所收集的去弹性散射截面 σ_{ne} 是用球透射法所测得的数据。收集到的数据共有五家。

1. 各家数据评价

(1) 1955 年美国 Bethe 等^[123] 用球透射法测量了 4.0, 4.5MeV 单能中子与 ^{239}Pu 相互作用去弹性散射截面,对测量结果进行了多次散射和裂变中子校正。所测结果误差达约

10%，Bethe 的测量是我们所见到的这方面的最早测量，测量误差较大，测量结果见表 10。

(2) 1957 年美国 Allen 等^[21]用球透射法测量了 0.25, 0.5, 1.0 MeV 单能中子与 ^{239}Pu 核相互作用的去弹性散射截面，对测量结果进行了多次散射，裂变中子校正，采用甄别阈去掉非弹性散射中子，所用甄别阈为入射中子能量的 85%，因此所测得的透射率中包含了不少非弹性散射中子，故 Allen 测得的 σ_{non} 误差较大，作者所标的测量误差达约 12%。我们认为 Allen 的数据在其误差范围内是可信的。测量数据见表 10。

(3) 1961 年苏联 Дегтярев 等^[24]用球透射法测量了 16.8 MeV 中子与 ^{239}Pu 核相互作用去弹性散射截面，用直径 15mm 的塑料闪烁体探测中子。未对测量结果进行多次散射校正，因此 Дегтярев 的测量结果误差应较大，但作者所标测量结果误差仅约为 3.5%，显然是偏小了，这是因为作者未把所有误差都估计在内的缘故。所测得数据见表 10。

(4) 1963 年美国 LRL 的 M. H. MacGregor 等^[25-28]用球透射法测量了 8.1, 11.9, 14.1 MeV 等单能中子与 ^{239}Pu 核相互作用去弹性散射截面，作者对测量结果进行了弹性散射能量损失，多次散射，探测器有限大小，探测器和源的有限距离，裂变中子等校正。测得结果误差约为 6%，我们认为 MacGregor 的测量，校正均很仔细，因此结果可信。所测得数据见表 10。

(5) 1965 年苏联 Дегтярев 等^[27]用球透射法测量了 13.4, 15.4, 18.4 MeV 等单能中子与 ^{239}Pu 核相互作用去弹性散射截面，对结果进行了多次散射校正，比作者 1961 年的工作仔细，所标测量结果误差约为 7% 与同类工作相当，测量结果见表 10。

2. 推荐数据

上述五家数据我们均予以推荐，只是 1961 年 Дегтярев 所测的 σ_{non} 值所标的误差太小，根据其测量方法及未对多次散射作校正，我们将其误差扩大到 10%。

我们将这些数据用

$$\sigma_{\text{non}} = B_0 + \sum_{i=1}^3 B_i (I_n E_n)$$

进行加权最小二乘法拟合，权取为截面误差平方倒数。具体采用逐步回归法，用 $F = 3$ 选进和剔出变量，结果只选进 B_0, B_1, B_3 ，其具体值及其标准偏差如下：

$$B_0 = 2.8033 \pm 0.0866$$

$$B_1 = 0.8445 \pm 0.1668$$

$$B_3 = -0.6496 \pm 0.1069$$

所得的拟合值及其标准偏差即为我们的推荐值见，表 11。

推荐值与实测值的比较见图 20。

由于现在的编评文章中均无直接推荐的 σ_{non} 数据，所以我们的推荐值未能与别的编评值比较。

四、弹性散射截面评价

收集到的实验数据有两类，一是由弹性散射微分截面积分，另一类是由全截面减去弹性散射截面。

1. 各家数据评价

(1) 文献[1, 3, 7, 9, 11, 12]中给出的弹性散射截面数据评价, 参看弹性散射微分截面数据评价。

(2) 1972年美国 A. Smith 等^[16, 28]用飞行时间法, 在 25° — 155° 八个角度测量了 0.30 — 1.5MeV 入射中子在 ^{239}Pu 核上弹性散射微分截面, 对测量结果进行了本底, 裂变中子, 多次散射, 束流衰减, 角分辨等校正, 谱仪的分辨为 1.5ns/m , 因此对于 $E_n < 900\text{keV}$ 的入射中子, 包括了从 $0 > Q > -57\text{keV}$ 能级上之非弹散中子, 对于 $E_n > 900\text{keV}$ 入射中子, 包括了从 $0 > Q > -76\text{keV}$ 能级上的非弹性散射中子。Smith 用八个探测器在不同角度同时进行测量, 因此测量精度高, 系统误差小, 加之各项校正仔细, 因此 Smith 的测量应该说是很好的。所测得弹性散射截面误差为 5 — 10% , 作者只发表了图形, 我们由图读得数据。

(3) 关于文献[2, 23—25, 27]中的五家去弹性散射截面得到弹性散射截面评价, 参看去弹性散射截面评价。

2. 推荐数据

我们推荐 Allen, Knitter, Smith 所给出的弹性散射截面数据。Coppola 只给出了弹性散射微分截面数据, 我们补充以光学模型计算的大小角度数据后得到弹性散射截面作为推荐数据, 考虑到补充了光学模型大小角度数据, 因此将求得的弹性散射截面误差扩大到 5 — 6% 。我们舍去了 Cranberg 的弹性散射截面数据, 因其分辨差, 混入了不少非弹性散射中子。也舍去了 Batchelor 的数据, 因为他的数据有系统误差存在, 误差也大, 而且他本人也未给出弹性散射截面数据。我们还舍去了 Kammerdiener 的数据, 因此他未给出弹性散射截面。而用光学模型算得的结果也未能很好通过实验点, 因此补充以光学模型大小角度数据后算出的弹性散射截面不可靠。

对于由去弹性散射截面得到弹性散射截面, 我们仅推荐 MacGregor 及 Дегтярев 的数据。Bethe 的去弹性散射截面误差较大, 在此能区由 Coppola 测得的弹性散射微分截面积分所得之数据还要准确些, 因此, 我们不采用 Bethe 的数据。也不采用 Allen 的去弹性散射截面, 因为我们推荐的 ^{239}Pu 全截面数据在此能区比现有的编评值系统偏小。为了避免由全截面引起系统误差, 故不采用 Allen 的去弹性散射截面数据。

将我们推荐的 ^{239}Pu 全截面数据^[28]减去 MacGregor 和 Дегтярев 的去弹性散射截面, 得到弹性散射截面推荐原始数据。

推荐的原始数据见表12。

我们将上述原始数据用

$$\sigma_{e,n} = B_0 + \sum_{i=1}^{10} B_i (\ln E_n)^i$$

进行加权最小二乘法拟合, 权取为截面误差平方倒数, 具体算法采用逐步回归法, 采用 $F=3$ 选进和剔出变量, 结果选得的 B_i 值及其标准偏差 ΔB_i 如下:

$$B_0 = 4.61159 \pm 0.05670$$

$$B_1 = -4.16286 \pm 0.25173$$

$$B_2 = 9.10246 \pm 0.98167$$

$$B_4 = -12.7682 \pm 2.24392$$

$$B_5 = 4.78115 \pm 1.94793$$

$$B_0 = 1.77257 \pm 0.96071$$

所求得拟合值及相应的标准偏差为我们的推荐值,见表 11 和图 21 所示。

3. 推荐值与现有编评数据的比较

将我们的推荐值与 Hunter^[17] 推荐值比较,我们的推荐值,在所标的误差范围内,在多数能区与 Hunter 推荐值符合。但在 $E_n = 200-600\text{keV}$ 能区内我们的推荐值比 Hunter 值大 500mb 左右,差别产生原因我们采用了 Smith 测量数据,而 Hunter 在推荐时尚未有 Smith 的数据。在 3—5MeV 能区,我们的推荐值比 Hunter 推荐值偏低约 500mb,原因可能是拟合方式不同之故。在 16—18.40MeV 能区内,我们的推荐值比 Hunter 推荐值约大 500mb 左右,这是因为我们采用全截面减去弹性散射截面的弹性散射截面数据,而 Hunter 不是采用这些数据。

五、非弹性散射截面评价

中子在 ^{239}Pu 核上的非弹性散射截面测量很少,主要是因非弹性散射中子中混入大量裂变中子,而且由于能量分辨的限制,使得低能级非弹性散射中子都混入到弹性散射中子,因此测得结果误差很大,达 30% 以上。

1. 各家数据评价

(1) 1959 年美国 LA 的 Cranberg 等^[3] 用飞行时间法,测了 0.55, 0.98, 2MeV 中子在 ^{239}Pu 核上的散射谱,将散射谱校正了裂变中子后得到非弹性谱,认为非弹性散射各向同性,因此由测得的某一角度之谱积分后乘以 4π 而得到非弹性散射截面。Cranberg 测量的分辨较差,很大一部分非弹性散射中子划入到弹性散射中子,而且中子探测器阈为 250keV,因此对于 $E_n < 250\text{keV}$ 的非弹性散射中子也未测到。所以若将作者所给出的各激发能区的非弹性散射截面相加,所得到的非弹性散射截面系统地偏小。作者所给出的误差仅是重复测量的误差。所测数据见表 13。

(2) 1969 年英国 Batchelor^[7] 用飞行时间法测量了 2, 3, 4MeV 单能中子在 ^{239}Pu 核上去弹性散射谱,将去弹性散射谱减去裂变中子谱而得到非弹性散射谱,将此谱用蒸发模型拟合,再积分而得到非弹性散射截面,对测量结果进行了多次散射,束流衰减校正。Batchelor 所测得去弹性谱较好,只是对 2MeV 入射中子所测得裂变谱偏硬。作者所标测量误差约为 30%,我们认为在其误差范围内数据可信。所测数据见表 14。

2. 推荐数据

由于 Cranberg 的数据系统偏小,因此将其数据舍去。我们推荐 Batchelor 的数据。推荐值见表 11。

3. 推荐值与现代编评的值的比较

我们推荐的 Batchelor 所测得的 2, 3, 4MeV 中子在 ^{239}Pu 核上非弹性散射截面数据,与 Hunter^[17] 推荐值相比较,在所标误差范围内符合较好。

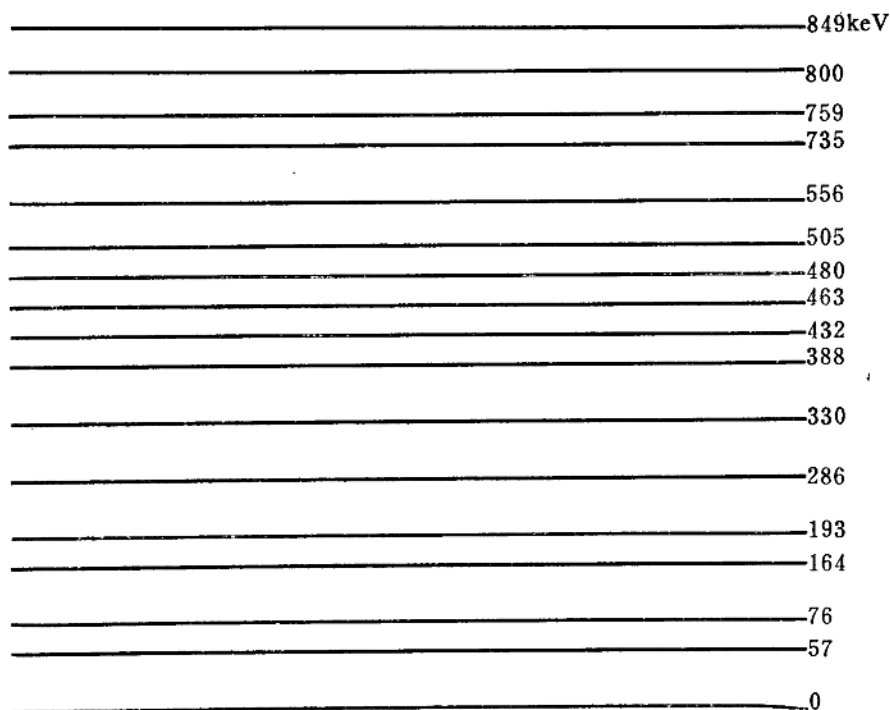


图1 ^{239}Pu 能级图

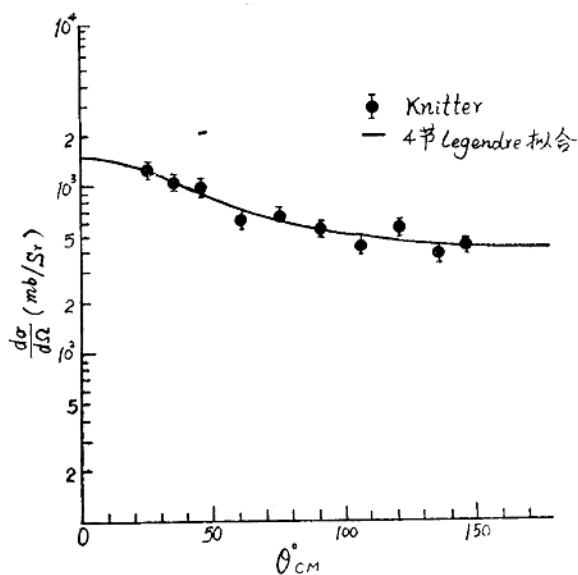


图2 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.19\text{ MeV}$

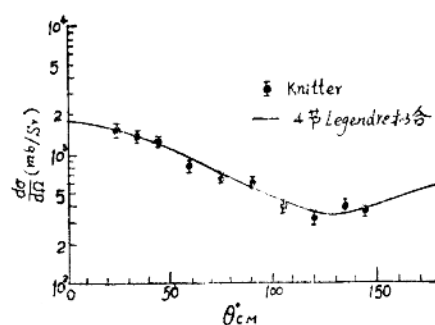


图 3 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.24\text{MeV}$

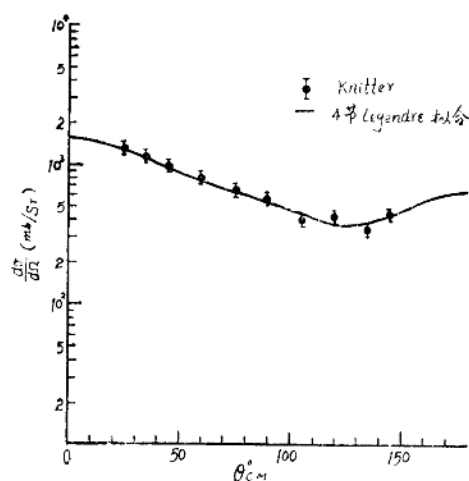


图 4 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.29\text{MeV}$

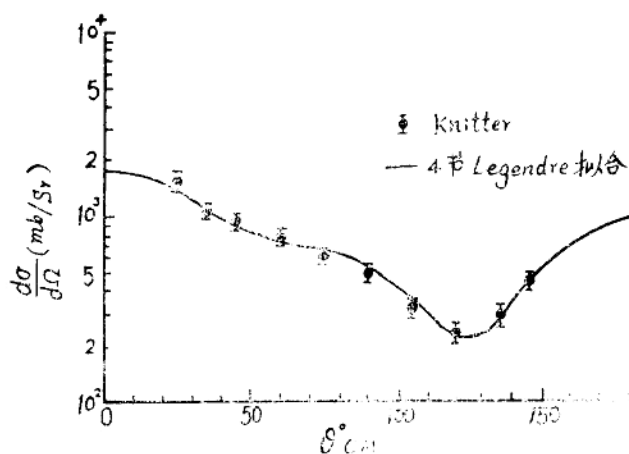


图 5 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.34\text{MeV}$

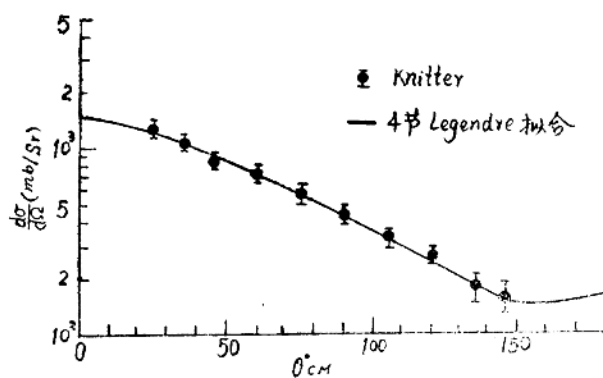


图6 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.38\text{MeV}$

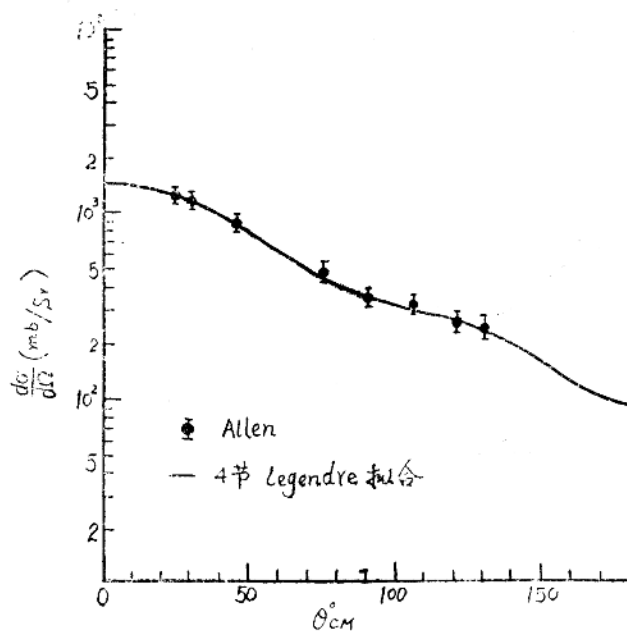


图7 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.50\text{MeV}$

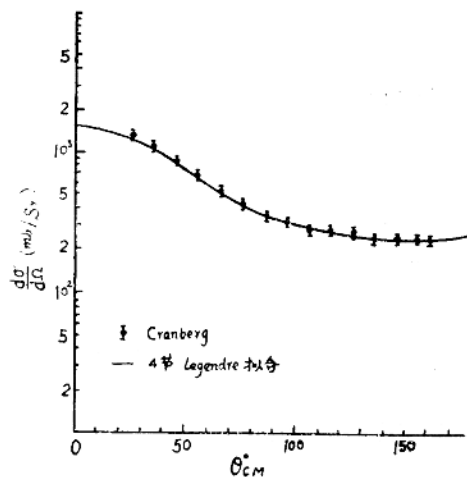


图8 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.55\text{MeV}$

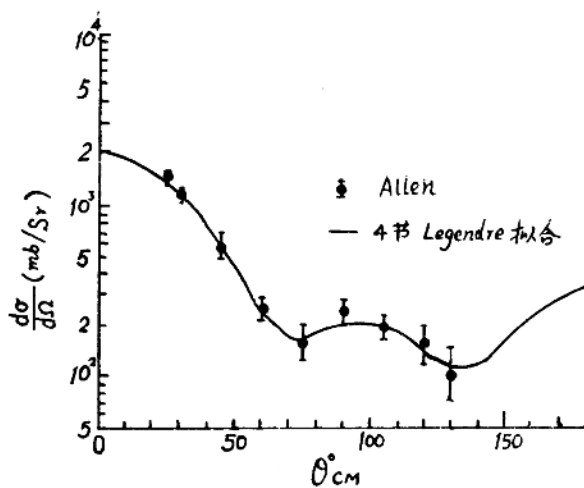


图9 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 0.98\text{MeV}$

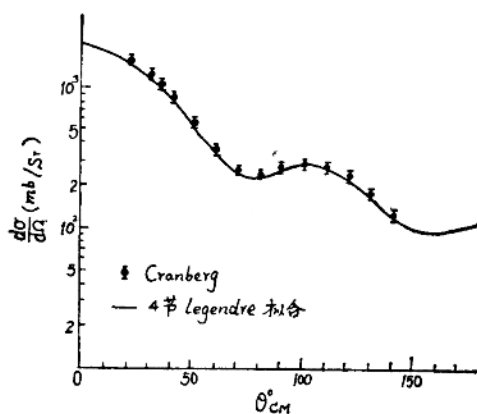


图10 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 1.0\text{MeV}$

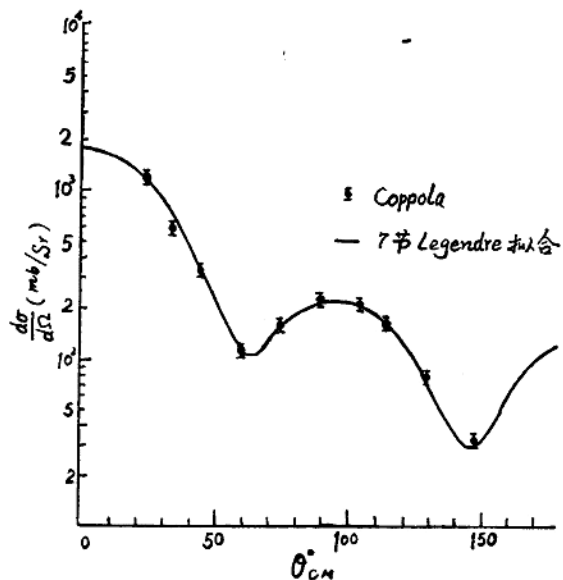


图11 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 1.5\text{MeV}$

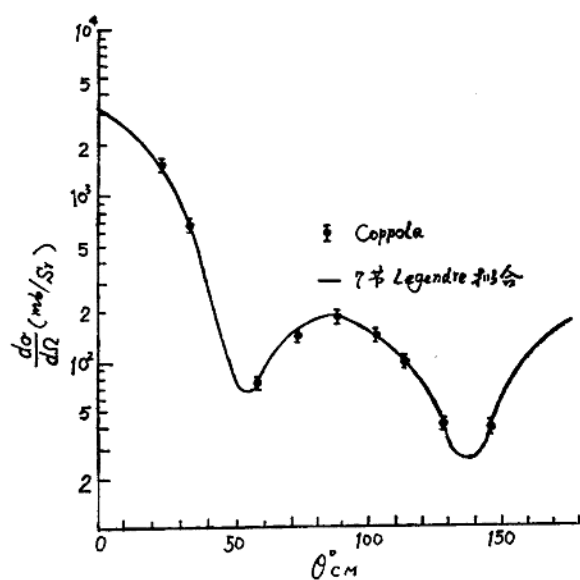


图12 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 1.9\text{MeV}$

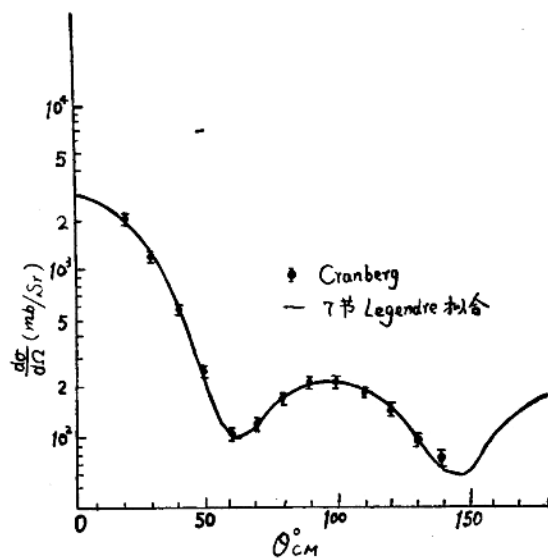


图13 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 2.0\text{MeV}$

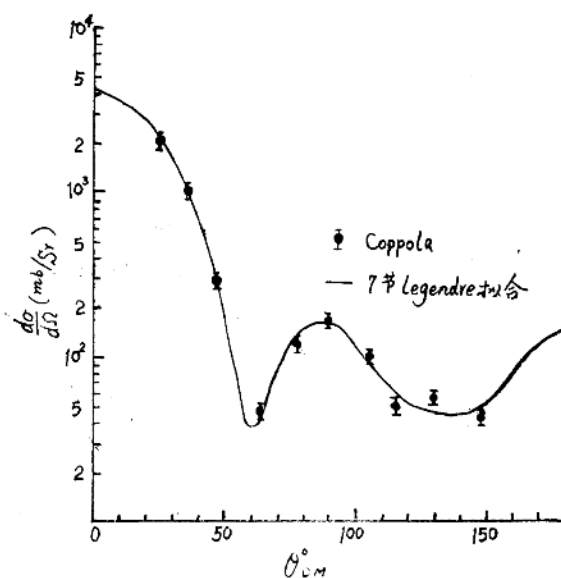


图14 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 2.3\text{MeV}$

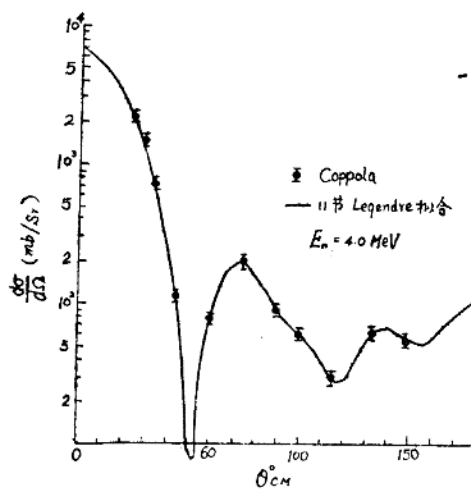


图15 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 4.0\text{MeV}$

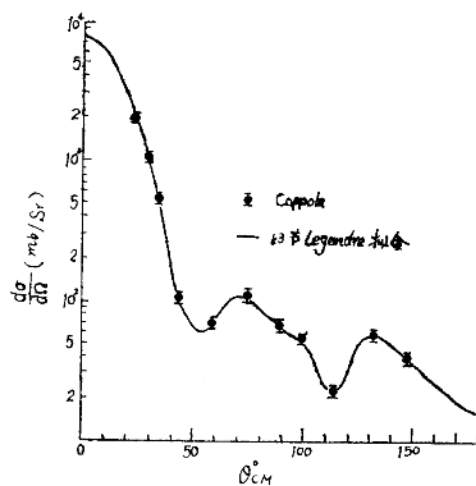
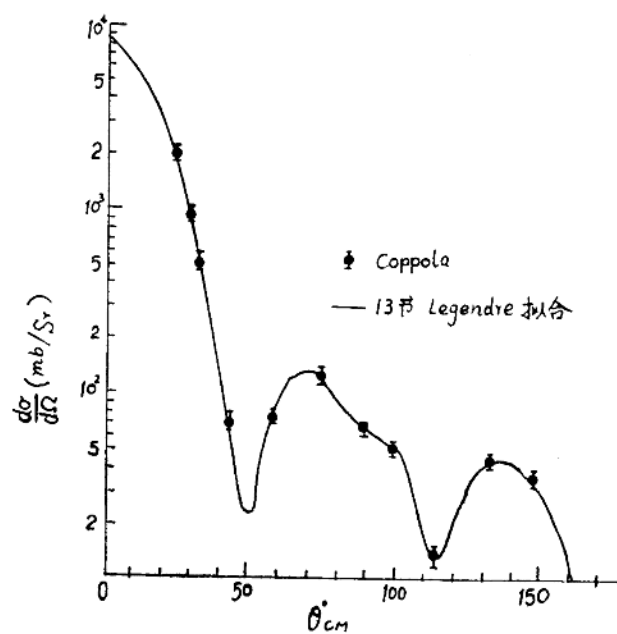


图16 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 4.5\text{MeV}$



17 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 5.0\text{MeV}$

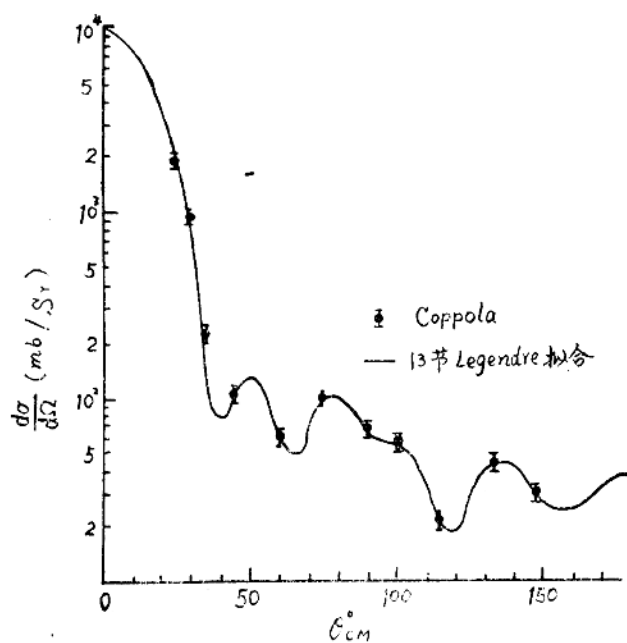


图18 ^{239}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 5.5\text{MeV}$

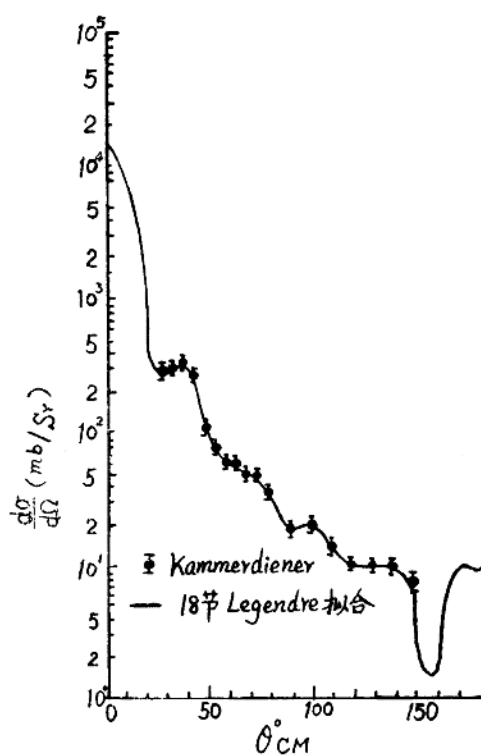


图19 ^{238}Pu 弹性散射微分截面
 $E_n = 14 \text{ MeV}$

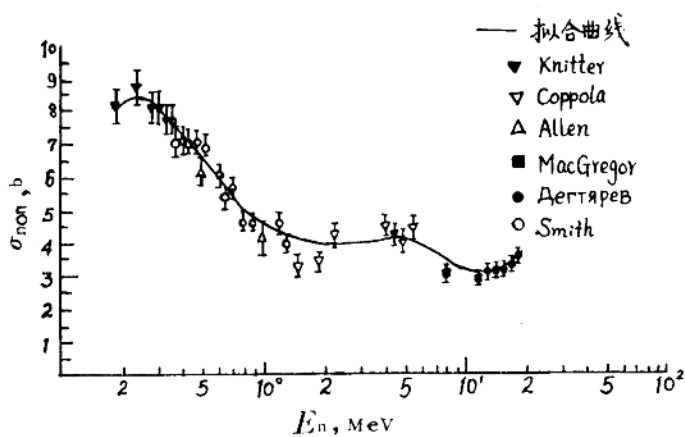


图20 ^{238}Pu 去弹性散射截面

图21 ^{239}Pu 弹性散射截面

表1 Allen 测得的 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 值

$E_n(\text{MeV})$					
$\theta_L^\circ \backslash \frac{d\sigma}{d\Omega}(\text{b/sr})$	0.5	1.0	$\theta_L^\circ \backslash \frac{d\sigma}{d\Omega}(\text{b/sr})$	0.5	1.0
25	1.19 ± 0.09	1.42 ± 0.11	90	0.35 ± 0.04	0.24 ± 0.04
30	1.17 ± 0.09	1.12 ± 0.11	105	0.32 ± 0.04	0.19 ± 0.04
45	0.90 ± 0.09	0.58 ± 0.11	120	0.26 ± 0.04	0.16 ± 0.04
60	0.60 ± 0.06	0.25 ± 0.04	130	0.24 ± 0.04	0.11 ± 0.04
75	0.48 ± 0.06	0.16 ± 0.04			

表 2 Cranberg 测得的 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 值

E_n (MeV)					
$\cos\theta_L \setminus \frac{d\sigma}{d\Omega} \text{ (b/sr)}$	0.55	$\cos\theta_L \setminus \frac{d\sigma}{d\Omega} \text{ (b/sr)}$	0.98	$\cos\theta_L \setminus \frac{d\sigma}{d\Omega} \text{ (b/sr)}$	2
0.90	1.32 ± 0.01	0.926	1.62 ± 0.01	0.939	2.16 ± 0.01
0.82	1.14 ± 0.01	0.853	1.24 ± 0.01	0.875	1.30 ± 0.01
0.71	0.891 ± 0.01	0.807	1.01 ± 0.01	0.770	0.611 ± 0.01
0.57	0.752 ± 0.01	0.754	0.860 ± 0.01	0.656	0.249 ± 0.01
0.42	0.557 ± 0.01	0.643	0.553 ± 0.01	0.515	0.104 ± 0.009
0.26	0.459 ± 0.01	0.500	0.368 ± 0.01	0.358	0.121 ± 0.009
0.087	0.421 ± 0.01	0.342	0.255 ± 0.01	0.191	0.173 ± 0.009
-0.087	0.330 ± 0.01	0.174	0.248 ± 0.01	0.018	0.218 ± 0.009
-0.26	0.283 ± 0.01	0	0.256 ± 0.01	-0.156	0.218 ± 0.009
-0.42	0.293 ± 0.01	-0.174	0.273 ± 0.01	-0.326	0.178 ± 0.009
-0.57	0.276 ± 0.01	-0.342	0.259 ± 0.01	-0.485	0.143 ± 0.009
-0.71	0.246 ± 0.01	-0.500	0.236 ± 0.01	-0.629	0.093 ± 0.009
-0.82	0.252 ± 0.01	-0.643	0.175 ± 0.01	-0.755	0.076 ± 0.009
-0.91	0.258 ± 0.01	-0.766	0.115 ± 0.01	-0.857	0.114 ± 0.008
-0.94	0.245 ± 0.01	-0.866	0.114 ± 0.01	-0.934	0.074 ± 0.008
		-0.906	0.084 ± 0.01		

表 3 Batchelor 测得的 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 值

E_n (MeV)			
$\theta_L \setminus \frac{d\sigma}{d\Omega} \text{ (b/sr)}$	2	3	4
30	1.17 ± 0.06	1.25 ± 0.07	1.36 ± 0.08
40	0.541 ± 0.027	0.525 ± 0.037	0.418 ± 0.030
50	0.211 ± 0.023	0.113 ± 0.021	0.100 ± 0.020
60	0.039 ± 0.023	0.107 ± 0.021	0.057 ± 0.020
75	0.150 ± 0.023	0.143 ± 0.021	0.129 ± 0.020
95	0.174 ± 0.023	0.171 ± 0.021	0.091 ± 0.020
105	0.150 ± 0.023	0.065 ± 0.021	0.050 ± 0.020
120	0.064 ± 0.023	0.041 ± 0.021	0.018 ± 0.020
135	0.076 ± 0.023	0.017 ± 0.017	0.056 ± 0.020