

0.11, 0.19 MeV 氘核引起的 ${}^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 中子能谱

孙汉城 戴能雄 张 应 胡选文 虞志康 马维义

用苾晶体反冲质子积分谱法, 测量了 0.11、0.19 MeV 氘核引起的 ${}^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 反应的中子能谱。定出了通过 ${}^8\text{Be}$ 、 ${}^5\text{He}$ 基态和第一激发态各道的分支比。结果表明, ${}^5\text{He}$ 道是主要的。

关键词 苾晶体, ${}^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 反应, $E_d=0.11, 0.19$ MeV, 能谱, 分支比。

一、引 言

${}^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 反应的中子能谱, 在 $E_d > 0.5$ MeV 能区, 已有较多测量, 其目的是了解 ${}^8\text{Be}$ 核的能级情况, 一般只测了中子谱高能部分的结果。在 $E_d \leq 0.5$ MeV 能区, 除我们自己测量的 0.4 MeV 能点^[1]外, 只有 Matuszynska^[2]用核乳胶测量的 0.2 MeV 能点, 但统计性差, 能谱的能阈高 ($E_n > 4$ MeV)。本工作测量了 0.11、0.19 MeV 氘核引起的 ${}^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 中子能谱, 得到了比较完整的中子谱 ($E_n > 0.5$ MeV) 数据, 并由此得到各反应道的分支比。

在 0.1—0.2 MeV 能区, 氘核同 ${}^7\text{Li}$ 核的相互作用截面很小, 这给实验工作带来两大困难: ① 源很弱。当束流为 100 μA 数量级时, 源强只有 10^3 — 10^4 中子/s。② $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 本底中子强。所以, 如何提高实验测量的信号本底比, 就成为一个关键。

针对以上问题, 我们采取了两项措施: (1) 选用了苾晶体反冲质子积分谱法^[3-8]。由于这种方法探测效率高, 对于弱源仍有足够高的计数率, 允许缩短实验测量时间, 因而靶上累积吸附的氘还不算多, 相应地, $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 本底也就不至于十分强。(2) 采用了“穿透式”的薄靶衬。即用 1 μm 厚的铝箔垫在不锈钢片上作底衬。氘穿透铝箔后阻止在不锈钢片中。在钢片中产生的 $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 本底, 因氘能量已极低, 故产额极小。实验结果表明, 这两项措施是成功的。

二、中 子 谱 仪

谱仪装置示意图见图 1。

苾晶体尺寸为 $\phi 30 \times 20$ mm。光电倍增管第九打拿极引出线性正脉冲供分析中子谱用; 从第十四打拿极引出正的饱和脉冲作中子- γ 分辨用。

产生同样幅度脉冲的质子与电子的能量变换关系, 由下式计算^[9]

$$\frac{dE_e}{dE} = \left(1 + K B \frac{dE}{dR} \right)^{-1}, \quad (1)$$

式中 E_e 与 E 分别代表电子与质子能量, $\frac{dE}{dR}$ 是质子在芪中的能量损耗率, KB 参数用平行于芪晶体圆柱轴入射的单色中子刻度得, $KB=0.011$ 。实验刻度的结果见表 1。

表 1 产生同样幅度脉冲的质子-电子的能量关系的实验刻度*

质子能量 E , MeV	2.18	2.47	2.98	4.63	5.76	14.02	14.85
相应的电子能量 E_e , MeV	0.55	0.662	0.810	1.59	2.18	7.4	8.19

* 所用单色中子分别由高压倍加器上的 D(d, n), T(d, n) 源与回旋加速器的 T(p, n) 源获得。

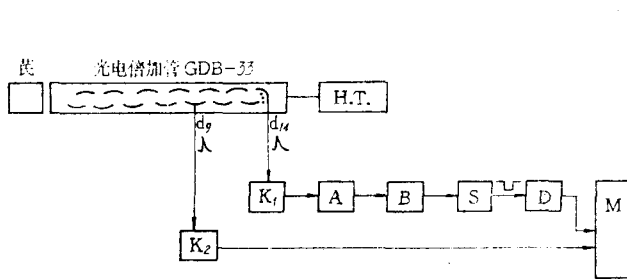


图 1 谱仪方框图

H.T.—高压电源; A—放大器; B—甄别器; S—成形电缆;
D—延迟线; K_1, K_2 —阴极跟随器; M—400 道分析器。

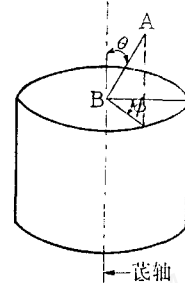


图 2 θ, ϕ 定义图
AP 为入射中子方向。

由于芪晶体是各向异性的, 从反冲质子脉冲幅度分布推算中子谱时, 需作此项修正。我们用 14.8 MeV 中子从不同方向射入晶体, 测量与入射中子同方向的 14.8 MeV 质子脉冲幅度, 结果是: 对于本文所用晶体, 质子脉冲幅度在 5% 误差范围内与 ϕ 角无关。与 θ 角的关系见表 2。 ϕ 和 θ 的定义见图 2。由单色中子刻度得谱仪分辨率如表 3 所示。

表 2 芪晶体对质子响应的各向异性

质子运动方向与圆柱轴夹角 θ	0°	30°	45°	60°	75°	90°	120°	145°	180°
质子脉冲幅度, 相对单位	1	0.994 ±0.027	1.055 ±0.053	1.128 ±0.028	1.143 ±0.057	1.128 ±0.028	1.06 ±0.05	1.01 ±0.05	1.00 ±0.05

表 3 谱仪能量分辨率

中子能量, MeV	2.18	2.47	2.98	4.63	5.76	14.02	14.85
能量分辨率, FWHM, MeV	0.33	0.37	0.45	0.60	0.75	1.54	1.63

三、 $^7\text{Li}(d, n)$ 中子谱测量

靶室装置如图 3 所示。氘束由原子能所的 300 kV 高压倍加器提供。为了减少靶上碳的沾污, 加了三个液氮冷阱。在接近靶头区, 加循环水盘管保温。

在与加速器管道紧密配合的固定架 F 上, 放置两个直径 5 mm 的准直孔 B_1 与 B_2 , 与靶的距离分别为 68.5 cm 和 50.5 cm。

靶采用两种。测 3.5 MeV 以下的中子谱，为降低 $D(d,n)$ 本底和避免 ${}^6\text{Li}(d,n)$ 本底，用纯 ${}^7\text{LiCl}$ 电镀于 $1\ \mu\text{m}$ 厚的铝箔上^[1]，然后附着在 0.1 mm 厚的不锈钢片上。靶厚由 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 阈反应测量后推算到对于 100、200 keV 氘的能耗估计，分别为 53 keV 和 49 keV。

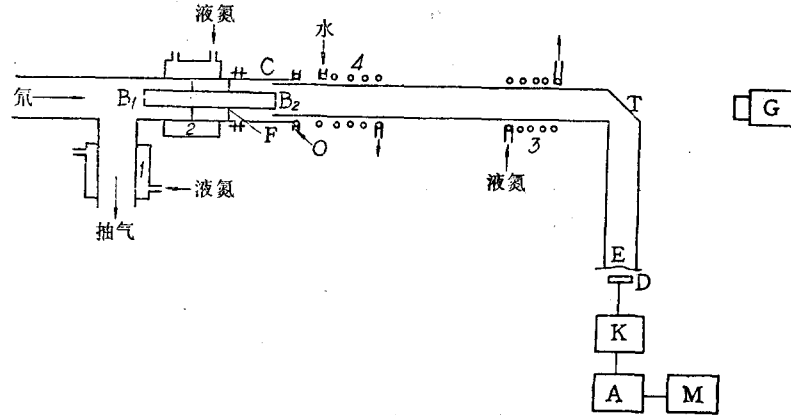


图 3 靶室实验装置示意图

1, 2, 3——液氮冷阱; 4——保温水管; B_1, B_2 ——准直孔; F——准直器固定架; C——联接管; O——真空橡皮圈; T——靶; G——中子谱仪; E——Mylar 膜; D——半导体探测器; K——前置放大器; A——放大器; M——百道脉冲分析器。

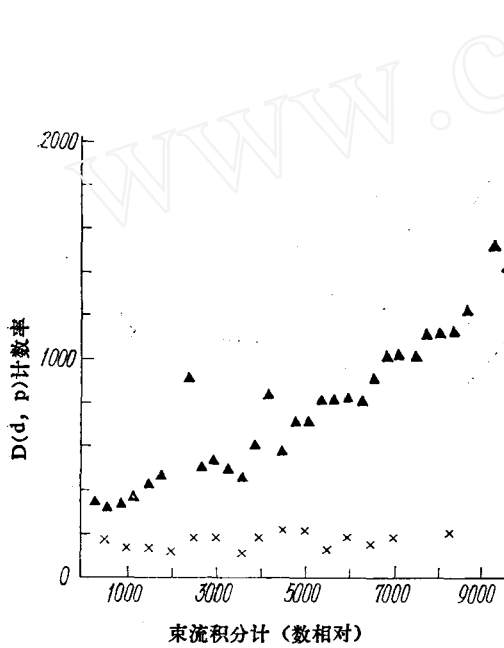


图 4 不同底衬的 D-d 本底增长情况

▲——不锈钢衬底; ×—— $1\ \mu\text{Al}$ 箔 + 不锈钢衬底; 入射氘能量 $E_d=100\ \text{keV}$ 。

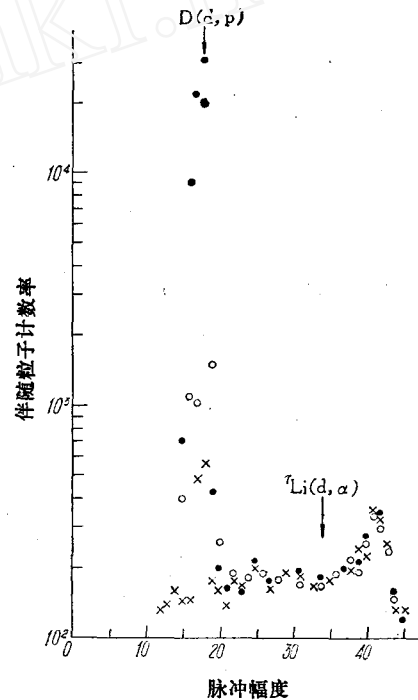


图 5 不同靶衬的伴随粒子能谱

●—— ${}^7\text{Li}$ + 不锈钢靶衬; ○—— ${}^7\text{Li}$ + $6\ \mu\text{Al}$ 箔 + 不锈钢底衬; ×—— ${}^7\text{Li}$ + $1\ \mu\text{Al}$ 箔 + 不锈钢底衬; 入射氘能量 $E_d=100\ \text{keV}$; 对 ${}^7\text{Li}(d,\alpha)$ 计数作了归一。

测 3.5 MeV 以上的中子谱, D(d,n)本底已无影响。除了一部分实验仍用纯 ${}^7\text{LiCl}$ 靶作校验外, 主要采用在不锈钢底衬上真空喷镀的天然 LiF 靶。LiF 厚约 $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 对于 200 keV 氘, 靶厚约 28 keV。

用薄铝底衬对降低 D(d,n)本底的效果十分明显。如图 4,5 所示。其中图 4 是用半导体探测器测量不同靶衬的 D(d,p)计数率的增长情况。图 5 是测得的不同靶衬的伴随粒子谱。

监视系统如图 3 所示。靶上产生的伴随粒子, 如 ${}^7\text{Li}(d,\alpha)$, ${}^6\text{Li}(d,\alpha)$ 的 α 粒子和 D(d,p)的质子等穿过等效厚度约 $8 \mu\text{m}$ 铝的 Mylar 薄膜与 3 mm 的空气层射入半导体探测器。用百道脉冲分析器测量带电粒子能谱。

实验测量时高压倍加器的加速电压分别调在 120 与 210 kV。考虑到 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 截面和靶厚, 同 ${}^7\text{Li}$ 起反应的氘核平均能量分别为 0.11 与 0.19 MeV。

对于 0.11 MeV 能量点, 我们测量了实验室系散射角 θ_L 为 0° 、 80° 和 150° 的中子谱, 靶心到苾晶体中心距离为 13 cm。对于 0.19 MeV 能量点, θ_L 为 0° 、 20° 、 50° 、 80° 、 120° 和 150° , 靶心到苾中心距离为 18 cm。

对于每个 θ_L 位置, 在测量中子谱前、后都用 γ 源标定。测低能中子谱时用 ${}^{137}\text{Cs}$ γ 源标定, 测高能谱时用 ${}^{24}\text{Na}$ 源。

对于每个角度, 同时测量中子谱和伴随粒子谱, 其中 ${}^7\text{Li}(d,\alpha)$ 计数作效应归一因子, D(d,p)计数作扣除 D(d,n) 本底归一用。测效应用 ${}^7\text{LiCl}$ 和 LiF 靶, 测本底用不锈钢靶。

四、数据 处 理

实验测得的是反冲质子脉冲幅度分布, 要还原成中子谱需经下列步骤:

(1) 由 γ 源测得的标定常数 (电子单位能量相应的脉冲幅度) 以及质子-电子能量变换表, 得到质子能量与脉冲幅度的关系。

(2) 计算各能量间隔 (以 0.5 MeV 为一道) 的质子计数, 得反冲质子能谱 $M(E)$ 。

(3) 利用 ${}^7\text{Li}(d,\alpha)$ 计数监视归一因子将各反冲质子谱归一。

(4) 用逆矩阵法在电子计算机上从反冲质子谱算得各 θ_L 角的中子谱 $\phi_0(E_n, \theta_L)$ [10,11] 中子谱第 k 道的值 ϕ_k 与质子谱第 i 道的值 M_i 有以下关系:

$$M_i = \sum_{k=i}^n \phi_k \Delta A_{i,k}. \quad (2)$$

式中 $\Delta A_{i,k}$ 是用蒙特卡罗法计算得的矩阵。

(5) 利用 D(d,p)计数与束流监视计数作归一因子, 扣除 $\phi_0(E_n, \theta_L)$ 中的 D(d,n) 中子本底, 得纯 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 中子谱 $\phi(E_n, \theta_L)$ 。

本工作中 D(d,n) 本底中子有两个来源: 靶和准直器。监视本底归一因子 C 由下式求得:

$$C = IAp + C_p Bq. \quad (3)$$

式中 I 是束流 (微库仑); C_p 是 D(d,p) 计数; p 和 q 是考虑到苾与准直器间距离和 D(d,n) 角分布的修正因子; A 是单位束流在准直器上产生的 D(d,n) 反应中子引起的 $\theta_L = 0^\circ$ 位置上的苾晶体中的反冲质子计数; B 是 D(d,p) 单位计数时, 靶头 D(d,n) 反应在 $\theta_L = 0^\circ$ 位

置上的苣晶体中产生的计数； A, B 由各不同 θ_L 角的 $D(d, n)$ 谱解联立方程得到。

(6) 由各 θ_L 的中子谱积分得到 4π 空间积分谱。

中子谱的误差，在需扣 $D(d, n)$ 本底的区域，主要是扣本底引起的误差，特别是由 A, B 的误差决定的 C 的误差。在其他能区，主要是统计误差，由下式给出^[11]：

$$\delta(\phi_k) = \sum_{i=1}^n |\Delta A_{ik}^{-1}|^2 M_i \quad (4)$$

式中 ΔA_{ik}^{-1} 是 ΔA_{ik} 的逆矩阵。

五、测量结果

1. 中子谱 各 θ_L 角度的中子谱见图 6, 7, 空间积分谱见图 8。图中用虚线表示的是外推的结果。图 8 上列出的平均能量由下式计算：

$$\bar{E}_n = \frac{\sum \Phi(E_n) E_n}{\sum \Phi(E_n)} \quad (5)$$

\bar{E}_n 的误差由下式计算：

$$\delta \bar{E}_n = [(\delta \Phi)^2 + (\delta E)^2]^{1/2} \quad (6)$$

式中 δE 是由于质子-电子能量变换关系不准引进的 E 的误差， $\delta \Phi$ 是由于 $\Phi(E_n)$ 各道误差

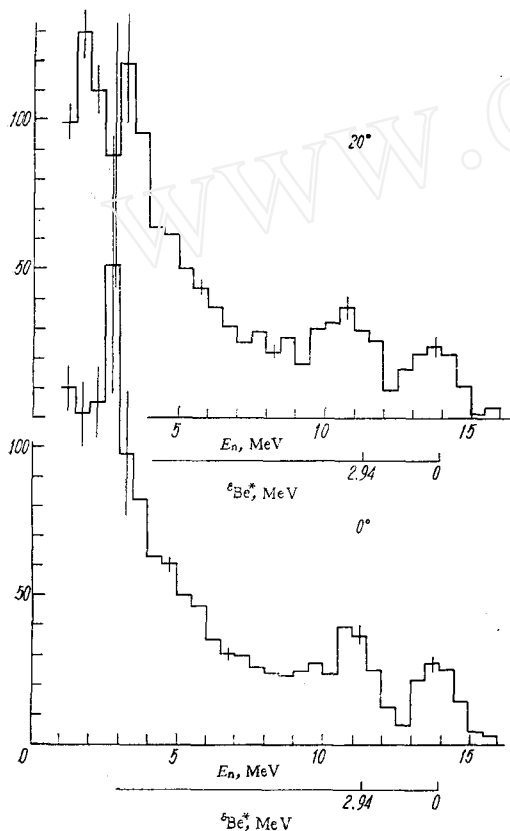


图 6-1 $E_d = 190 \text{ keV}$ 的分角度中子谱

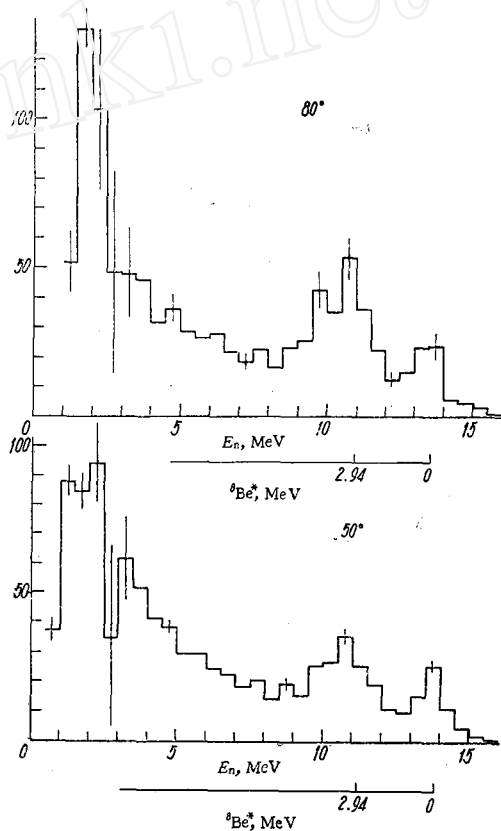


图 6-2 $E_d = 190 \text{ keV}$ 的分角度中子谱

注：图 6—图 8 中，纵坐标都是 $\Phi(E_n)$ (相对)。

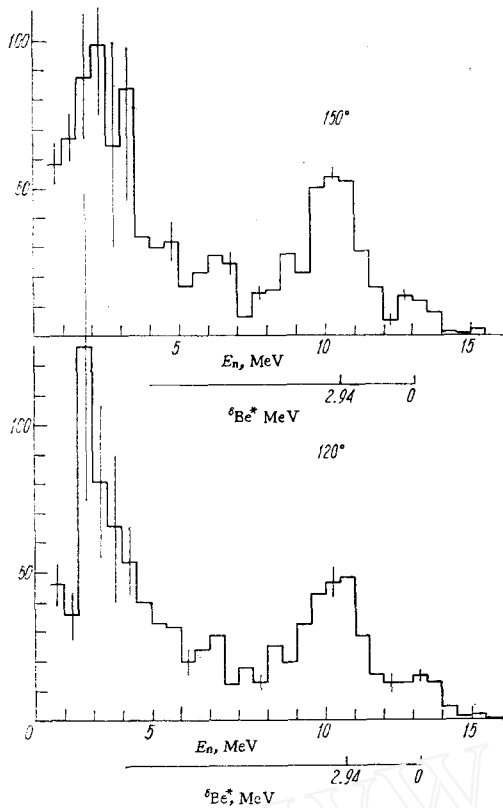


图 6-3 $E_d = 190$ keV 的分角度中子谱

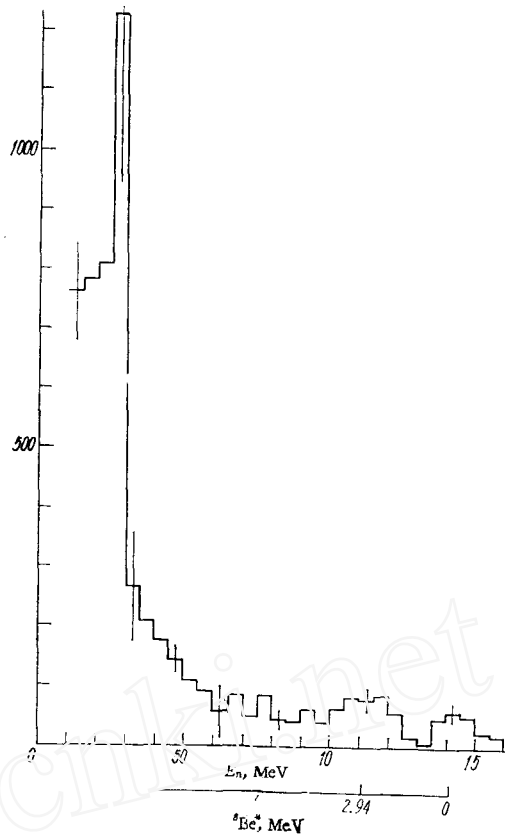


图 7-1 $E_d = 110$ keV 的分角度中子谱

$\delta\Phi(E_n)$ 引进的, 由文献[12],

$$\delta\Phi = \frac{1}{\sum\Phi(E_n)} \left[\sum (E_n - \bar{E}_n)^2 (\delta\Phi(E_n))^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

2. 分支比 对于低能氘核引起的 ${}^7\text{Li}(d, n)$ 反应, 只有下列几种可能的反应道^[1]:

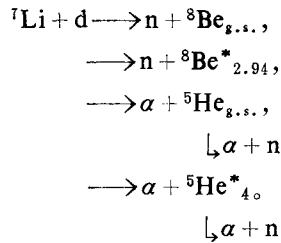


表 5 各反应道分支比

E_d , MeV	${}^8\text{Be}_{g.s.}$	${}^8\text{Be}_{2.94}^*$	${}^5\text{He}_{g.s.}$	${}^5\text{He}_4^*$	${}^8\text{Be}$ 道	${}^5\text{He}$ 道
0.19	6.5 ± 0.4	19.9 ± 1.0	35.0 ± 3.5	38.6 ± 2.2	26.4 ± 1.1	73.6 ± 4.2
0.11	3.9 ± 0.6	16.1 ± 2.3	49.7 ± 10.5	30.3 ± 10.2	20.0 ± 2.4	80.0 ± 14.6

用文献[1]的分析方法得到各反应道的分支比列于表 5。

由表 5 可见, 在低能氦入射情况下, 经 ^5He 道的级联衰变是主要的。

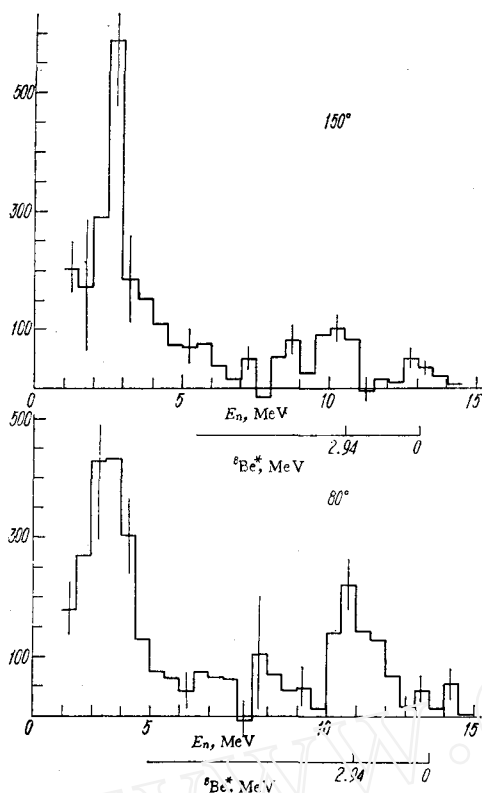


图 7-2 $E_a = 110 \text{ keV}$ 的分角度中子谱

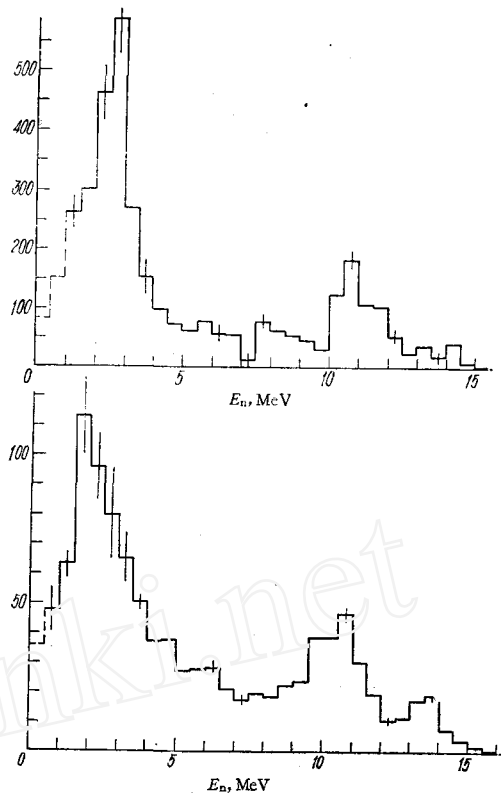


图 8 $E_a = 110, 190 \text{ keV}$ 的全空间积分中子谱
 (上) $E_a = 110 \text{ keV}$; $\bar{E}_n = 4.89 \pm 0.25 \text{ MeV}$.
 (下) $E_a = 190 \text{ keV}$; $\bar{E}_n = 5.37 \pm 0.23 \text{ MeV}$.

参 考 文 献

[1] 阎辰等, 原子核物理, 2,33(1980).
 [2] K. Matuszynska, *Acta Phys. Pol.*, 2,331(1980).
 [3] H. W. Broek et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 31,1063(1960).
 [4] Г. Г. Дорошенко и др., Вопросы дозиметрии и защиты от излучений, Атомиздат, Москва, 1964.
 [5] J. B. Ashe et al., *AF* 33(616)-6362.
 [6] R. Batchelor et al., *Nucl. Instrum. Methods*, 13,70(1962).
 [7] C. W. Lewis et al., *Nucl. Instrum. Methods*, 35,261(1965).
 [8] A. P. Veselkin, *J. Nucl. Energy*, 19,37(1965).
 [9] C. D. Swatz, *Fast Neutron Physics*, Interscience Publishers, 1960, p. 1,211.
 [10] 姚玲, 原子能科学技术, 3,209(1975).
 [11] Г. Г. Дорошенко, *Изв.АНССР*, 27,1308(1963).
 [12] J. Grundl, *Nucl. Sci. Eng.*, 8,604(1960).

(编辑部收到日期: 1982年8月3日)