

验能量范围内,发生的都是弹性散射.

二、实验装置

实验装置包括单色脉冲中子源、中子探测器及屏蔽装置、飞行时间谱仪和中子通量监督器等. 实验布置见图 1.

单色脉冲中子源是由 2.5 兆电子伏特静电加速器的质子束,经加速器尾部切割,脉冲化,轰击氘靶,通过 $T(P, n)He^3$ 反应获得的. 高频切割电压: 3500 伏, 4 兆周. 脉冲 γ 峰的半宽度 ≤ 3 毫微秒. 靶是氘靶, 钛膜厚度为 0.830 毫克/厘米², 氘对钛的原子比为 1.24. 实验测得的中子能量展宽为 100 千电子伏特, 主要是由靶厚引起的.

中子探测器采用发光衰落时间较短的闪烁液体和响应较快、增益较大的光电倍增管.

飞行时间谱仪的线性范围为 $\sim 80\%$, 微分线性为 $\pm 5\%$, 积分线性为 $\pm 1.9\%$, 总的分辨时间 < 0.9 毫微秒.

水箱内有一固定位置,可放置标准放射源,用以校正仪器的效率.

中子通量监督器放置在 90° 方向离靶 2.5 米处. 为了检验水箱和转车在转动过程中对监督器的影响,在 135° 方向离靶 2.5 米处也放置了一个监督器. 试验表明,二个监督器计数之比在转车转动过程中不变,有或无散射样品对监督计数也没有影响.

整个测量系统的长期工作稳定性(48 小时),好于 2.1%.

系统对束流的对称性,即正或负散射角度时的计数偏差小于 1.6%.

三、实验方法

1. 中子能量的调节

中子与原子核散射时,由于核的反冲,要损失部分能量. 根据动量和能量守恒原理,散射中子能量 E'_n 与入射中子能量 E_n 有如下关系:

$$E'_n = \frac{E_n}{(1+A)^2} [\cos\theta + \sqrt{A^2 - \sin^2\theta}]^2. \quad (3)$$

式中 A 为反冲核的质量数, θ 为散射角. 上式表明,同一能量的入射中子与不同的靶原子核散射,即使散射角 θ 相同,其散射中子的能量也是不同的. 相对测量中,必须根据所给定的待测元素的入射中子能量,通过 (3) 式来确定标准元素的入射中子能量,以保证它们的散射中子能量相同,探测效率也相同. 所以,标准元素的中子入射能量与样品的中子入射能量是不同的,必须经常调节.

2. 微分截面的测量

样品是空心圆柱体,外径为 25 毫米,内径为 10 毫米,高为 50 毫米. 样品与靶的距离为 12—15 厘米. 同一实验条件下,测量了中子飞行距离为 1 米左右的九个角度的散射谱. 为了保证实验条件相同,每次测量前后都用标准放射源在水箱中固定的位置对仪器的稳定性和效率进行校验.

$\theta_i = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 57^\circ, 74^\circ, 94^\circ, 111^\circ, 128^\circ, 135^\circ$. 测铁时的 $E_n = 1.10, 1.14,$

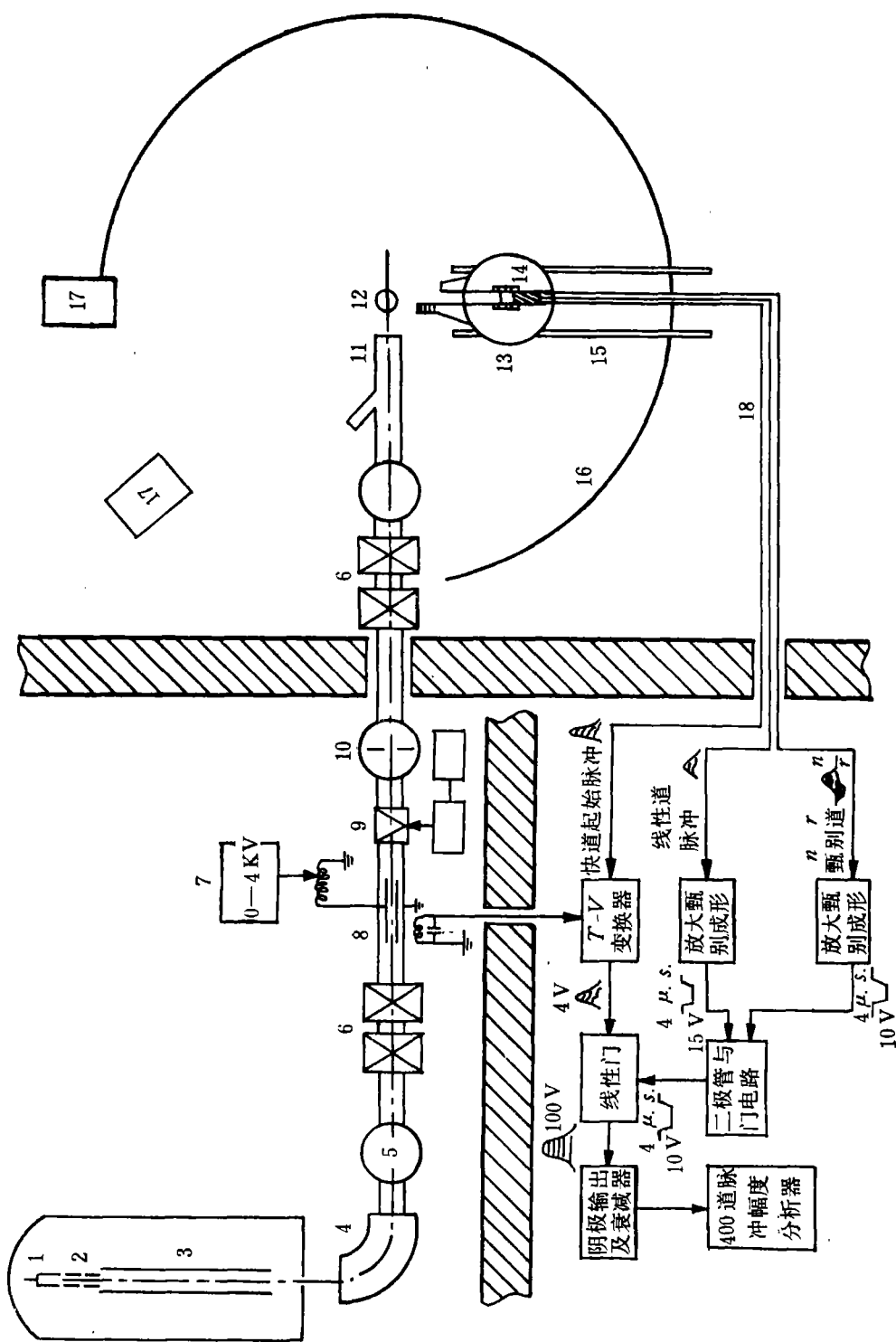


图1 实验布置图

1. 离子源; 2. 透镜; 3. 加速管; 4. 90°磁分析器; 5. 观察窗; 6. 四极透镜; 7. 高频发生器; 8. 偏转板; 9. 真空机组; 10. 观察窗及光栏; 11. 靶室; 12. 样品; 13. 转车及水箱; 14. 中子探测器; 15. 水箱轨道; 16. 转车轨道; 17. BF₃长计数器监督器; 18. 电缆

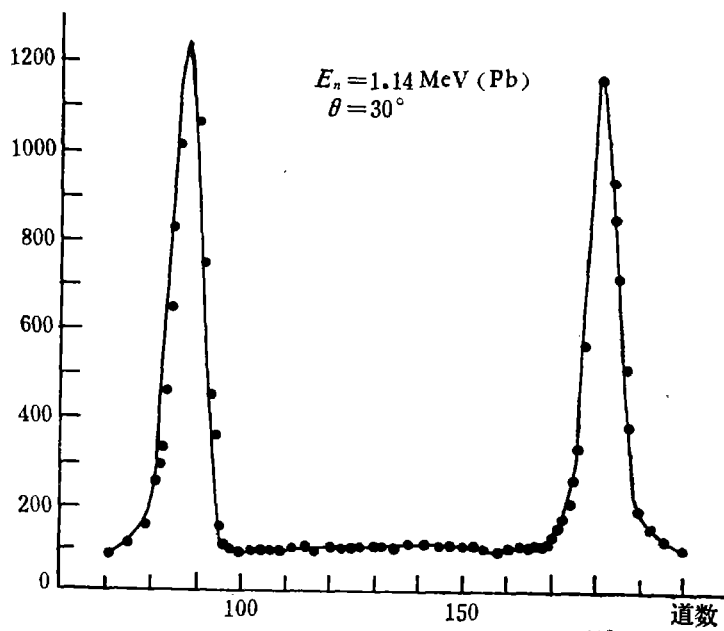
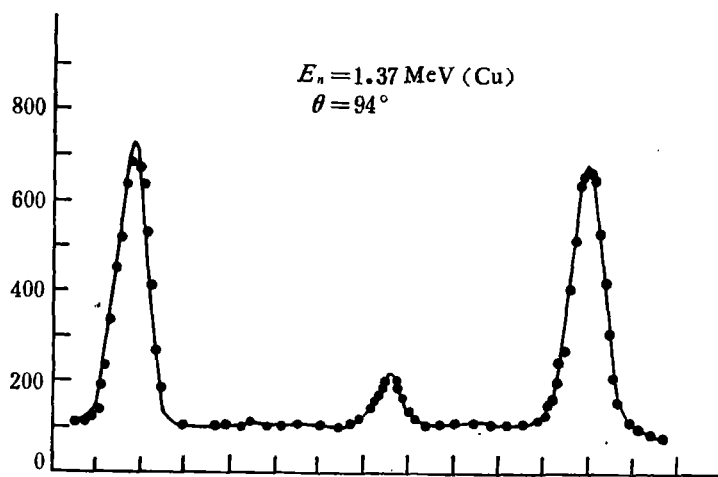
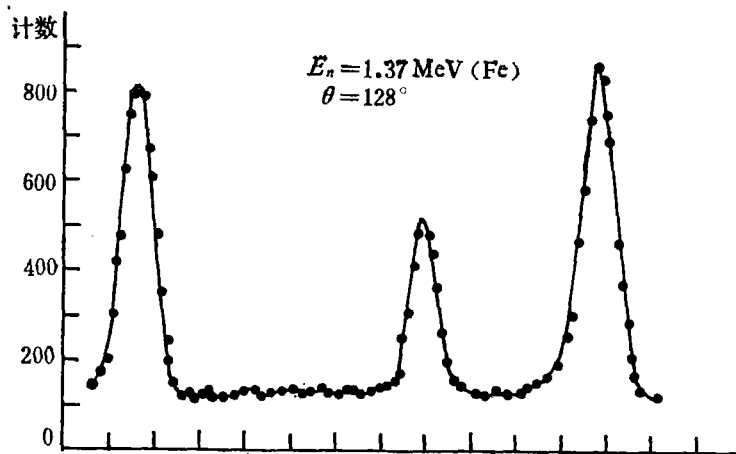


图 2 散射中子能谱

1.37 兆电子伏特。测铜时的 $E_n = 1.14, 1.37$ 兆电子伏特。测铅时的 $E_n = 1.14, 1.35$ 兆电子伏特。典型的散射谱见图 2。

图谱上有两只高度、宽度大致相同的弹性散射峰。这是由于加速器尾部切割器在同一周期内输出两个脉冲束流的缘故。非弹性峰与弹性峰能明显分开。

四、数据处理和结果

1. Φ 的确定

Φ 是样品的净散射中子计数, 对监督计数归一, 得

$$\Phi(E_n, \theta_i) = \left(\frac{C}{M_1} - \frac{B}{M_2} \right) - \left(\frac{t_1}{M_1} - \frac{t_2}{M_2} \right) \frac{D}{t_3} \quad (4)$$

式中 C, B 和 D 分别是在 θ_i 处测得的能量为 E_n 的弹性散射中子及本底中子之和、开机本底中子和停机实验室本底中子的计数。这些计数即是能谱图上相应处的面积。 M_1, M_2 分别是测 C 和 B 时的监督器计数。 t_1, t_2 和 t_3 分别是 C, B 和 D 的测量时间。

2. 中子通量减弱和多次散射效应的实验校正

中子在样品内与核发生碰撞。碰撞结果, 中子或者被样品吸收, 或者离开样品, 或者再经受下一次碰撞, 造成中子通量的减弱及多次散射效应。对于这种效应的校正, 可用 Monte Carlo 方法计算, 再用实验外推法验证几个点子^[7,8]。本实验中, 我们设计了一套样品, 见表 1, 用实验外推法确定每个观察角的校正因子。

表 1 样品的尺寸(毫米)和质量(克)

元 素 编 号		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
Cu	质量	187.25	155.52	115.90	86.04	46.40
	外径	25.2	25.2	25.0	25.0	25.2
	内径	10.2	13.9	17.2	19.5	22.2
Fe	质量	161.89	130.38	101.38	74.38	40.03
	外径	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
	内径	9.9	14.1	17.2	19.6	22.0
Pb	质量	240.53	194.43	150.95	104.9	57.75
	外径	25.1	25.1	25.1	25.0	25.0
	内径	9.7	13.9	17.1	19.6	22.0
C	质量	35.48	30.18	23.35	14.46	9.31
	外径	25.0	25.3	25.4	25.2	25.2
	内径	10.4	14.1	17.3	20.0	22.2

这些样品的高度和外径固定, 仅改变内径。样品在中子路径上的原子核数目随着其内径的增大而减少, 样品的中子通量减弱和多次散射效应也相应减少。当内径接近于外径时, 该效应趋于零。所以, 测量到的单位质量净散射中子计数 $\varphi_m(E_n, \theta_i)$ 与样品的质量 m 有一定的函数关系。当 $m \rightarrow 0$ 时, $\varphi_0(E_n, \theta_i)$ 即是中子被理想薄的样品散射时的单

位质量净散射中子计数。

所以,质量为 m 的样品在 θ_i 角的校正因子

$$K_x = \frac{\varphi_0(E_n, \theta_i)}{\varphi_m(E_n, \theta_i)} \quad (5)$$

图 3, 列举了铜在 $\theta_i = 40^\circ$, $E_n = 1.10$ 兆电子伏特的校正曲线。 $\varphi_0(E_n, \theta_i)$ 是在图上由 m 外推至零而得到的。

这种方法所测得的校正因子的误差为 3—8%。结果见表 2。校正因子随 θ_i 缓慢地变化。

3. 散射角度的修正

中子源、散射样品和探测器都有一定的线度,彼此之间有一定的张角,测量到的微分截面应是在 θ_i 附近一定张角范围内的平均值。我们应求出与这个数值相应的 θ_L 。

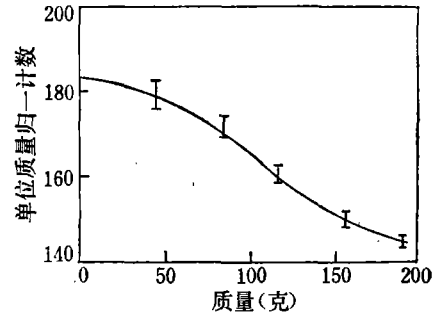


图 3 校正曲线

$$\begin{aligned} \sigma(\theta_i) &= \frac{\int_{\Delta\theta_i} \sigma(\theta_i) d\Omega}{\Delta\Omega_i} = \sum_{i=0}^{N-1} \int_{\Delta\theta_i} B_i P_i(\cos \theta_i) d\Omega / \Delta\Omega_i \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} B_i P_i(\cos \theta_L) = \sigma(\theta_L). \end{aligned} \quad (6)$$

对于有限的 $\Delta\Omega$, 引进适当的近似,由 $P_i(\cos \theta_L)$, 得到 θ_L , 结果见表 2。

4. 实验结果

根据 (2) 式求得微分截面。实验结果的误差主要来自以下几部分:

- (1) 净效应计数 $\varphi(E_n, \theta_i)$ 的统计误差。整个测量过程中,该误差大多在 0.8—2.0% 之间,最大为 2.2%。
- (2) 样品所含原子核数目的误差,约 1%。
- (3) 校正因子的误差,大多在 3—7%,最大为 7.8%。

表 2 通量减弱和多次散射校正因子

K		θ_i	20°	30°	40°	57°	74°	94°	111°	128°	135°
		θ_L	20°8'	30°4'	40°3'	57°3'	74°1'	94°	110°45'	127°58'	134°59'
E_n (1.10 MeV)	Cu	1.45	1.36	1.27	1.20	1.26	1.16	1.10	1.17	1.20	
	误差(%)	3.2	3.3	3.5	3.3	3.8	3.9	3.8	4.3	4.3	
	Pb	1.24	1.23	1.29	1.17	1.11	1.09	1.14	1.14	1.14	
	误差(%)	3.4	3.6	4.1	4.8	7.3	4.9	3.7	7.7	7.7	
	Fe	1.40	1.33	1.41	1.23	1.14	1.13	1.09	1.16	1.19	
	误差(%)	3.3	3.4	3.6	3.6	5.7	7.8	4.1	5.6	5.6	
	C	1.36			1.20						
	误差(%)	5.5			3.3						
E_n (1.37 MeV)	Fe	1.48	1.40	1.50	1.30	1.20	1.19	1.15	1.22	1.25	
	误差(%)	3.3	3.4	3.6	3.6	5.7	7.8	4.1	5.6	5.6	

(4) 标准样品截面的误差. 碳的截面数值取自 ANL-6172, 其误差为 5.2%.

总的实验结果误差在 5—10%.

实验结果见表 3.

表 3 微分截面(毫巴/球面弧度)及其误差

元素	能量 (MeV)	θ_L	20°8'	30°4'	40°3'	57°3'	74°1'	94°	110°45'	127°58'	134°59'
			$\sigma(\theta_L)$	530	468	365	252	189	159	149	154
Cu	1.14	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$	8.6	5.5	7.2	7.0	7.3	7.4	7.4	7.6	7.6
		$\sigma(\theta_L)$	535	456	312	177	145	137	135	146	163
	1.37	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$	8.3	7.1	7.2	7.1	7.3	7.4	7.4	7.6	7.6
		$\sigma(\theta_L)$	455	347	306	194	109	81	76	107	116
Fe	1.10	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$	8.4	7.2	7.2	7.2	8.5	10.1	7.6	8.5	8.5
		$\sigma(\theta_L)$	466	415	261	186	108	84	83	105	124
	1.14	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$	8.4	7.2	7.3	7.2	8.5	10.1	7.7	8.5	8.4
		$\sigma(\theta_L)$	556	445	323	178	98	92	107	163	185
	1.37	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$	8.3	7.1	7.1	7.2	8.5	9.9	7.5	8.4	8.4
		$\sigma(\theta_L)$	1110	900	463	293	215	308	350	288	258
Pb	1.14	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$	8.4	7.3	7.7	7.9	9.7	7.5	10.0	10.0	10.0
		$\sigma(\theta_L)$	1250	1020	624	231	196	334	384	264	223
	1.35	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$	8.5	7.2	7.4	8.0	9.7	7.5	9.9	10.0	10.0
		$\sigma(\theta_L)$									

微分截面可由勒襄德多项式级数展开. 当展开的项数 N 小于观察角的数目时, 可用最小二乘法处理, 求得最佳的展开系数. 在 X-2 型电子计算机上求解, 得

$$\sigma(\theta_i) = \sum_{l=0}^{N-1} B_l P_l(\cos \theta_i), \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, 9$, 取五项, $N = 4$. 弹性散射总截面 $\sigma = 4\pi B_0$ 结果见表 4 及图 4、图 5、图 6.

表 4 微分截面勒襄德多项式展开结果

编号	B_i (毫巴)					Q	σ (巴)	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(\%)$
	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4			
1	231.0	120.9	177.4	37.3	58.6	0.31	2.91	3.4
2	205.9	88.9	200.6	63.0	102.0	1.16	2.52	3.6
3	157.2	111.4	169.0	31.8	19.7	2.41	1.97	3.9
4	159.6	96.0	178.3	32.5	44.5	3.42	2.01	4.1
5	193.5	78.2	259.7	61.6	63.5	0.62	2.43	3.9
6	357.2	208.7	247.6	324.4	168.4	4.00	4.50	4.4
7	369.5	300.0	290.5	484.7	235.5	2.27	4.64	4.1

编号 1. Cu, 1.14 MeV; 2. Cu, 1.37 MeV; 3. Fe, 1.10 MeV 4. Fe, 1.14 MeV;
5. Fe, 1.37 MeV; 6. Pb, 1.14 MeV; 7. Pb, 1.35 MeV

Q 为各实验点偏离平均值的偏差的平方和

五、光学模型计算结果

核反应的光学模型理论认为核子与原子核相互作用, 可把原子核看成部分透明的介质。中子与原子核相互作用的平均效应, 可用具有自旋-轨道耦合作用项的复数两体势来描写。

取定域两体势

$$U(r) = -V_{\text{Re}} f(r) - iW_{\text{Im}} g(r) - V_{\text{s.o.}} \left(\frac{1}{r}\right) h(r) \lambda^2 \sigma \mathbf{L}.$$

V_{Re} , W_{Im} 和 $V_{\text{s.o.}}$ 分别是实数势、虚数势和自旋-轨道耦合势的深度。

$f(r)$ 取 Woods-Saxon 型。

$$f(r) = \left\{ 1 + \exp\left(\frac{r - R_1}{a}\right) \right\}^{-1}.$$

$R_1 = r_1 A^{1/3}$. $g(r)$ 分面吸收和体吸收两种情况。面吸收, 取 gauss 型。

$$g(r) = \left[\exp\left(\frac{r - R_2}{b}\right)^2 \right]^{-1}.$$

$R_2 = r_2 A^{1/3}$. 体吸收, 取 Woods-Saxon 型的微分形式。

$$g(r) = 4 \exp\left[\frac{r - R_2}{b}\right] \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_2}{b}\right) \right]^{-2}$$

$R_2 = r_2 A^{1/3}$. $h(r)$ 也取 Woods-Saxon 型的微分形式。

$$h(r) = \frac{d}{dr} |f(r)| = \frac{1}{a} \exp\left[\frac{r - R_1}{a}\right] \times \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_1}{a}\right) \right]^{-2}$$

取 $r_1 = r_2 = r_0$ 。

这样光学势共有六个参数: V_{Re} , V_{Im} , $V_{\text{s.o.}}$, a , b , r_0 。

求解 Schrödinger 方程, 计算穿透因子、势弹性散射。用 Hauser-Feshbach 公式计算复合核弹性散射。计算是在 709 型电子计算机上进行的。

$$\sigma_{el}(\theta) = \sigma_{sc}(\theta) + \sigma_{cc}(\theta).$$

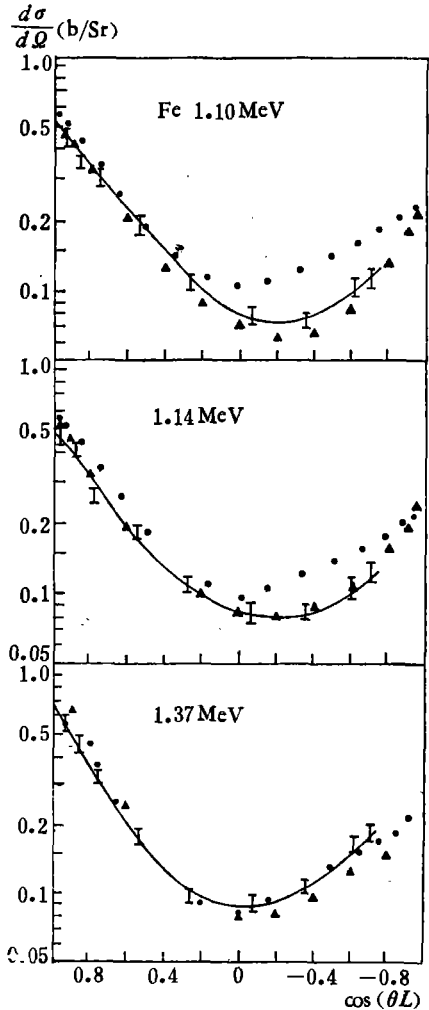


图 4 Fe 的中子弹性散射微分截面
▲ BNL-400 — 实验曲线 ● 理论计算值

$$\sigma_{el} = \sigma_{sc} + \sigma_{ce}$$

式中 $\sigma_{el}(\theta)$ 、 $\sigma_{sc}(\theta)$ 分别是弹性散射、势弹性散射微分截面。 $\sigma_{ce}(\theta)$ 是复合核弹性散射微分截面，其角分布比较平坦，可近似认为各向同性。 σ_{el} 、 σ_{sc} 、 σ_{ce} 分别是弹性散射、势弹性散射和复合核弹性散射截面。

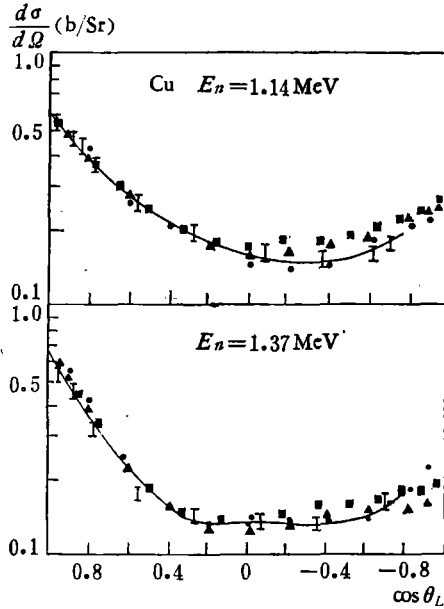


图5 Cu的中子弹性散射微分截面

▲ BNL-400 ● AWRE 0-63/67
— 实验曲线 - - 理论计算值

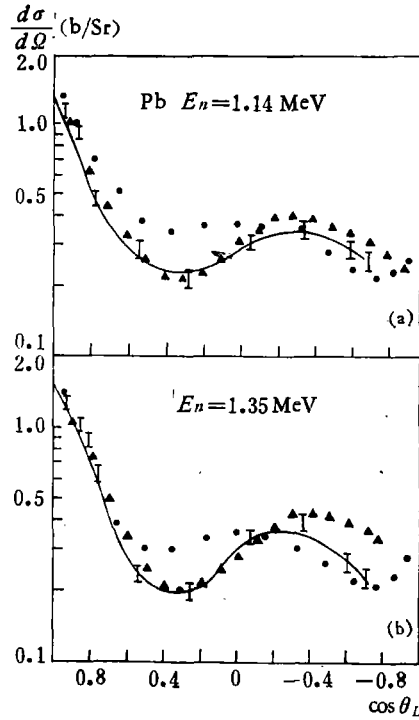


图6 Pb的中子弹性散射微分截面

▲ BNL-400, (a) (0.9, 0.98, 1.0 MeV), (b) (1.2 MeV) — 实验曲线 - - 理论计算值

先采用 Bjorknind and Fernbach 提出的面吸收型光学势参数^[9]计算。这是一套对各种元素和能量平均适用的参数。计算表明，弹性散射截面与实验值符合尚好。微分截面中，铜的符合情况较好。铁的微分截面的后向角部分，计算值较实验值大。调节参数，减小铁的实数势深度，结果有所改善。铅的微分截面趋势是符合的，但与角度的关系不及实验值灵敏，好像有些“平均”掉了。

光学势参数见表5。

表5 光学势参数

编号	参数	V_{Re} (MeV)	W_{Im} (MeV)	$V_{s.o.}$ (MeV)	r_0 (fm)	a (fm)	b (fm)	参考资料
1	面吸收	50	7.0	9.5	1.25	0.65	0.98	[9]
2	体吸收	50.8-0.5E	7.0	10.0	1.20	0.65	0.5	[2]

计算结果见表6、表7与图4、图5、图6。铜和铅取表5中第一套参数，铁取第二套参数。为便于比较也列入了实验结果和别人的工作结果^[3,4]。

