

用旋转位相补偿器法测量 He^+ 通过倾斜箔后发射的圆偏振光

孙昌年 叶 慧 汤国魂 葛启云

(复旦大学物理二系)

1980年9月26日收到

六十年代以来,束箔光谱技术已经广泛地应用于研究原子和离子的光谱、能级、激发态平均寿命以及原子精细结构等。1973年 U. Fano 和 J. H. Macek 预言离子束通过倾斜箔后与靶原子相互作用将使受激的束流原子极化,1974年 H. G. Berry 等人^[1]首先在实验上观察到了此种效应。原子的极化可通过测量它所发出的圆偏振光来鉴定。偏振光的性质习惯上用一组斯塔克斯参数 I, M, C, S 来描述^[2]。圆偏振度定义为

$$\frac{S}{I} = \frac{\sigma(-) - \sigma(+)}{\sigma(-) + \sigma(+)} \quad (1)$$

其中 $\sigma(-)$ 和 $\sigma(+)$ 分别表示右旋和左旋偏振光强度。

任何测量偏振光的系统需要一个位相补偿器(例如四分之一波长片)和一个线偏振器作为基本的光学元件。如图1所示。光线通过位相

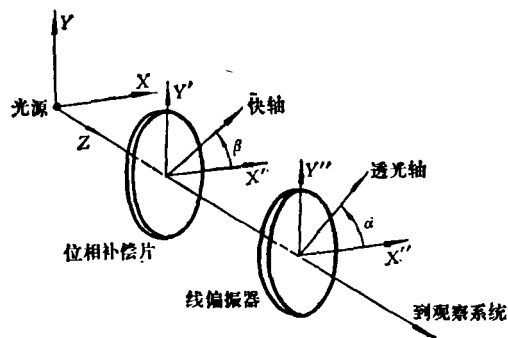


图1 圆偏振光的测量几何

补偿器后,其平行与垂直于快轴方向的电矢量之间有一位相差 δ 。当 δ 为 $\pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$ 时可以使圆偏振光或椭圆偏振光变成平面偏振光,再用线偏振器判断该圆偏振光是左旋的还是右旋的。从该系统透射的光强度用斯塔克斯

参数可以表示为^[3]

$$I_T(\alpha, \beta, \delta) = \frac{1}{2} \{ I + (M \cos 2\beta + C \sin 2\beta) \cos 2(\alpha - \beta) + [(C \cos 2\beta - M \sin 2\beta) \cos \delta + S \sin \delta] \sin 2(\alpha - \beta) \} \quad (2)$$

其中 α, β 的定义已在图1中标明。透射光 I_T 可以用单色仪进行分析,并通过一光电倍增管用单光子测试技术来测量。

一般固定 β 为 45° , 改变 α 角,测量透射光的圆偏振度。我们曾用这个方法测量 $^{15}\text{N}^+$ 束通过 60° 倾斜箔后所发射的 5676 \AA 线的圆偏振度^[4],以及 $^{15}\text{N}^+$ 束先后通过倾斜箔和垂直箔后 ^{15}N 核的极化度^[5]。使用这个方法要求所用位相补偿器引进的位相为 $(2k + 1) \frac{\pi}{2}$ 。

H. G. Berry 等人在1977年^[3]提出了用转动位相补偿器的方法测量偏振光,数据用在线计算机进行傅里叶分析,可以同时得到偏振光的四个斯塔克斯参数。所用位相补偿器的位相差 δ 可以不一定严格地为 $(2k + 1) \frac{\pi}{2}$ 。对一般的位相片,

$$\delta(\lambda) = \frac{2\pi d}{\lambda} [n_e(\lambda) - n_o(\lambda)] \quad (3)$$

其中 λ 为待测谱线的波长, $n_o(\lambda)$ 和 $n_e(\lambda)$ 分别为寻常光和非寻常光的折射率, d 为位相片厚度。

在确定的实验中, δ 与 α 是常数,测到的光强可用傅里叶展开式表示:

$$I_T(\beta) = C_0 + C_2 \cos 2\beta + C_4 \cos 4\beta + S_2 \sin 2\beta + S_4 \sin 4\beta \quad (4)$$

这个式子可用实验数据来拟合。设 I_i 为

$\beta = \beta_i$ 时测到的光强, 实验点一共有 N 个, $i = 1$ 至 N , $\beta_i = (i - 1)\Delta\beta + \beta_0$, $\Delta\beta$ 为 β 角每次改变的度数。

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i; \\ C_2 &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos 2\beta_i; \quad C_4 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos 4\beta_i; \\ S_2 &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin 2\beta_i; \quad S_4 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin 4\beta_i. \end{aligned} \right\} (5)$$

因此(4)式中的系数可由实验数据算得。对照(4)式与(2)式, 比较傅里叶展开式各项的系数, 可求得 S, I, M, C 与 C_0, C_2, C_4, S_2, S_4 的关系:

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{2}{1 - \cos \delta} [C_4 \cos(2\alpha + 4\beta_0) + S_4 \sin(2\alpha + 4\beta_0)]; \\ C &= \frac{2}{1 - \cos \delta} [S_4 \cos(2\alpha + 4\beta_0) - C_4 \sin(2\alpha + 4\beta_0)]; \\ S &= \frac{C_2}{\sin \delta \sin(2\alpha + 2\beta_0)} \\ &= \frac{-S_2}{\sin \delta \cos(2\alpha + 2\beta_0)}; \\ |S| &= (C_2^2 + S_2^2)^{1/2} / \sin \delta; \\ I &= C_0 - \frac{1 + \cos \delta}{1 - \cos \delta} [C_4 \cos(4\alpha + 4\beta_0) + S_4 \sin(4\alpha + 4\beta_0)]; \end{aligned} \right\} (6)$$

其中 β_0 是 β 角的初始位置。特别当 α 取 45° , β_0 取 0° 时, 上式都可化简, 四个斯塔克斯参数可以同时方便地得到。

实验与结果

所测谱线是 He II $3d^2D-4f^2F$ 跃迁的 4685 Å 线, 图 2 是测量装置的示意图。

0.6—1.5 MeV He^+ 束由本校静电加速器提供。为保证箔的使用寿命, 束流强度选用 0.25 μA 。所用碳箔厚度约为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 金箔厚度为 $300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ($\sim 1500 \text{Å}$)。选用 4431 Å 四分之一

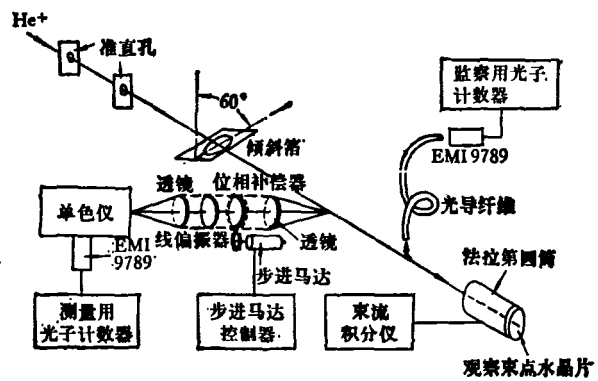


图 2 测量装置示意图

波长片作位相补偿器, 对 4685 Å 线,

$$\delta = 85.10^\circ.$$

用步进马达控制位相补偿器的转动, 每步改变 0.1π 。用 YM-2 型光谱仪、EMI-9789QB 光电倍增管和自制单光子计数器测量光强。光谱仪狭缝宽 0.5mm 时所测光子计数率约 400/秒, 本底计数率约 6—8/秒。用法拉第圆筒和束流积分仪对束流变化进行监察, 同时用光导纤维把光耦合至另一光子计数器进行总光强监察, 用这两种方法对光谱仪出射光强随束流的变化进行归一。实验曲线见图 3 (分别表示了 0.6 MeV, 1.0 MeV, 1.5 MeV 三种能量的 He^+ 束通过倾斜碳箔与金箔后光强随 β 角的变化曲线)。

将实验数据代入(5)式和(6)式, 可算得三种能量的 He^+ 束分别通过碳箔和金箔后激发所发射 4685 Å 偏振光的斯塔克斯参数和圆偏振度。计算结果见表 1)。

讨 论

1. 表征光强的斯塔克斯参数 I 随着 He 离子能量的升高而减小。据 E. Veje 在有关离子束与碳箔作用所致离子电荷态的分布与能量关系一文^[6]中分析, 带有电荷 ie 的粒子出现的几率为

$$p_i = [n! / i!(n-i)!] a^{n-i} (1-a)^i, \quad (7)$$

式中 n 为原子实外的电子数, a 是与入射光能量有关的参数, 对 He^+ , $p_1 = 2a(1-a)$ 。在该文中可查得相对于 0.6, 1.0, 1.5 MeV 三种情况

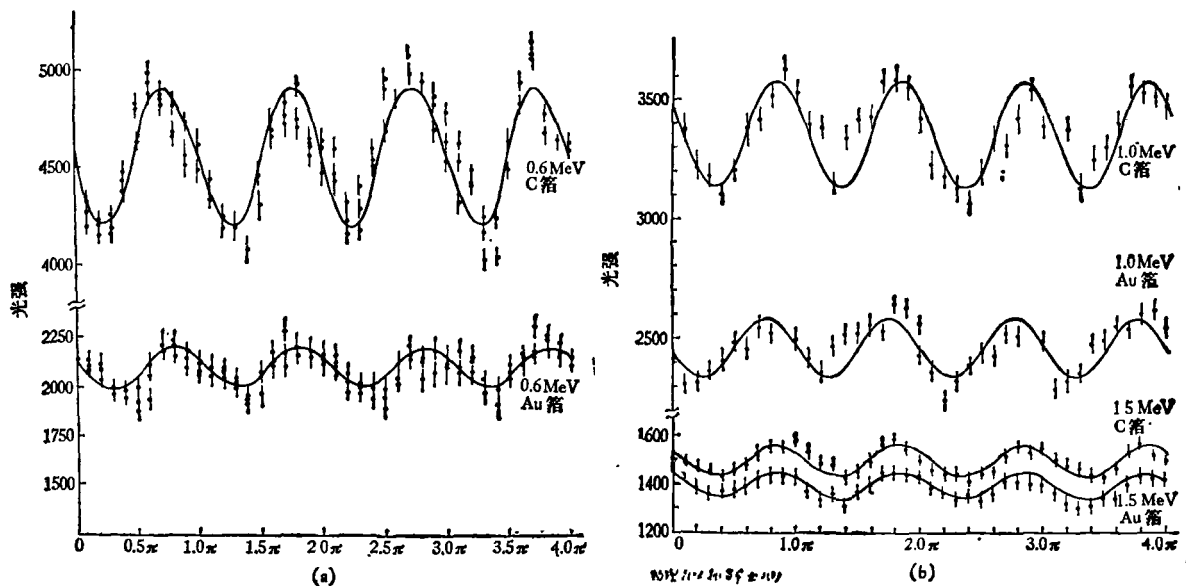


图3 光强随 β 角变化的实验曲线
He II 4685 Å; $3d^2D-4f^2F$ 跃迁

表1 计算结果

$E(\text{MeV})$	箔	C_0	C_2	S_2	C_4	S_4	I	M	C	S	$S/I(\%)$
0.6	C	4561	50	-362	15	101	4575	-164	152	366	8.0 ± 0.5
	Au	2086	66	-72	-30	-30	2072	-64	-13	104	5.0 ± 0.6
1.0	C	3364	100	-150	12	5	3354	5	28	181	5.4 ± 0.5
	Au	2452	-22	-112	9	-50	2420	102	38	115	4.8 ± 0.6
1.5	C	1498	40	-45	14	4	1504	-10	-29	60	4.0 ± 0.3
	Au	1391	37	-40	4	-2	1392	10	1	54	3.9 ± 0.4

的 α 值分别为0.2, 0.1, 0.06; 算得 p_1 为0.3, 0.2和0.1, 其相对比例关系与本实验碳箔的结果相符。

2. 在同样的能量下, 倾斜 Au 箔产生的极化比倾斜碳箔的小, 这在能量为 0.6 MeV, 碳箔所致极化数值较大时尤为明显。这与 D. A. Church 关于极化与箔材料的关系一文^[7]所述结果相符。金箔的散射比碳箔的大, 许多 He 离子偏离了原来的束流方向, 这可能是测到的圆偏振度偏小的原因之一。

3. 关于极化随束流能量的变化, 情况就比较复杂。它与电荷态的产生有关, 也有人认为这可能与束流速度同激发态电子轨道速度的匹配有依赖关系^[8]。最终它和倾斜箔产生极化的机制有关, 而这仍是一个国际上正在探讨的问

题。为进一步研究极化的机制, 用单晶金箔作激发箔靶的实验正在进行。

我们感谢王善达同志在电子仪器方面的支持, 并对复旦大学物理系真空镀膜组为我们提供单晶和非单晶金箔的郁英等同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. G. Berry et al., *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 751.
- [2] R. C. Jones, *J. Opt. Soc. Am.*, **31**(1941), 488.
- [3] H. G. Berry et al., *Appl. Opt.*, **16**(1977), 3200.
- [4] B. I. Deutch, 刘崇恒、陆福全等, 复旦学报, **2**(1979), 1.
- [5] B. I. Deutch, 刘崇恒、陆福全等, 原子核物理, **2**(1980), 205.
- [6] E. Veje, *Phys. Rev. A*, **14**(1976), 2077.
- [7] D. A. Church, *Phys. Lett.*, **55A**(1975), 167.
- [8] B. I. Deutch, *Proceeding of Conference on Atomic Inner Shell Phenomena*, Geilo, (1978).