

用沟道效应研究束箔离子的极化机制*

汤家镛 葛启云 陆福全 孙昌年

翁台蒙 杨建军 叶 慧 杨福家

(复 旦 大 学)

1983年11月23日收到

提 要

使用能量为1MeV的 He^+ 离子沿 $\langle 110 \rangle$ 晶轴方向和随机方向穿透单晶金箔,对 He^+ 的 $4f \rightarrow 3d$ 跃迁的4686 Å光的Stokes参数进行了精细的测量,为有争议的束箔离子的极化机制提供了实验依据.

引 言

快离子穿过相对于束的垂直面倾斜的箔后会极化,即离子激发态的角动量会在某方向上占优势.实验上最早为Berry^[1]所观察到.这种取向是由于束箔作用的几何条件不满足圆柱轴对称性,从而破坏了角动量不同磁量子数的集居分布的统计对称性.这种角动量取向由于超精细相互作用而形成量子拍,并可转移给原子核,形成极化的原子核^[2-7].Fano和Macek^[8]则从理论上作了描述和讨论.

倾斜箔会形成离子或原子角动量取向的机制,一直是有争议的问题^[9,10].通常认为取向是由最后一层表面引起的^[11-13],在箔体内相互作用产生的任何状态在经过表面时不再有“记忆”.但也有些作者认为离子在体内产生的“排列”(alignment)可以在箔表面处转变成“取向”(orientation)^[14-17].

实际上可以由一种实验来十分明确地检验上述两种相反的观点中究竟是哪一种说法正确.即使用单晶箔代替普通箔进行束箔光谱实验.在离子倾斜穿过单晶箔时,当沿着晶轴方向时,相互作用有轴对称性,而非晶轴方向则无轴对称.在表面,因是同一张箔,故结构没有变化.因此离子在沿沟道方向^[18]和随机方向入射时,在箔下游测量Stokes参数之一的极化度 S/I 的变化,将能检验上述两种观点:若 S/I 有明显变化,则说明体作用有影响,若无明显变化,则说明角动量取向来自表面的相互作用.体内产生的效应至表面将会失去“记忆”.

美国拉特杰尔斯大学的Temmer和贝尔实验室的Tolk及Feldman等人根据这一物理思想进行了实验^[19].他们使用 He^+ 离子穿透单晶硅箔,在箔的下游测量极化度 S/I ,证明了原子极化和体作用无关.由于极化测量对数据的统计要求极高,而光子计数又较

* 中国科学院科学基金资助的课题.

弱, 他们的实验误差较大($\sim \pm 25\%$)。我们使用单晶金箔进行实验, 并使用较精确的旋转四分之一波长片方法测量 Stokes 参数^[20], 实验误差减少到 $\sim \pm 10\%$ 。以更精确的实验结果证明离子角动量取向应由表面相互作用引起, 体内的效应似乎带不到表面。

实 验 装 置

本实验是在本校 3MeV 静电加速器上进行的, 实验装置如图 1 所示。能量为 1MeV 的 He^+ 离子经两相距 150cm 的准直孔穿, 过单晶金箔靶, 最后进入法拉第筒。单晶金箔为本校物理系所制备, 厚度约 1300 Å, 表面为(111)面。靶放置在三维靶架上, 通过步进马达驱动可绕三互相垂直的轴旋转, 改变 φ, θ, ψ 角。为了测量极化值 S/I , 金箔必须倾斜放置, 因此选择 $\langle 110 \rangle$ 轴沟道方向作为 He 束入射方向。此时, 金箔与入射束的倾角约为 35.5° 。

在箔下游与束相垂直的方向上放置光学测量系统: 依次安放透镜、 $\lambda/4$ 片、线偏振片、透镜、滤色片, 使 He^+ 离子束所发出的 $4f \rightarrow 3d$ 跃迁的 4686 Å 光经透镜成平行光, 经 $\lambda/4$ 片和线偏器可测量 Stokes 参数, 经滤色片滤去此波长附近的其它谱线, 最后进入 EMI 9789 光电倍增管, 进行单光子计数。在靶的束入射的一侧, 放置 Au-Si 面垒探测器, 测量背散射 He 粒子能谱及沟道坑, 以确定低密勒指数晶轴方向, 本实验选取 $\langle 110 \rangle$ 轴作入射方向。

单光子计数器讯号及背散射计数讯号输入 S-80 多道分析器作 y 轴计数分析; 法拉第筒收集到的离子电荷数经束流积分仪, 输出脉冲作为监察计数, 通过双定标器作多定标测量的道址推进讯号。S-80 和 PDP-11/34 计算机相联, 后者在数据舍取后按指定程序进行拟合。

三维靶室下部安放钛离子泵, 靶室前有液氮冷阱, 管道用分子泵抽高真空, 靶室真空度为 $3 \times 10^{-6} \text{Torr}$ 。

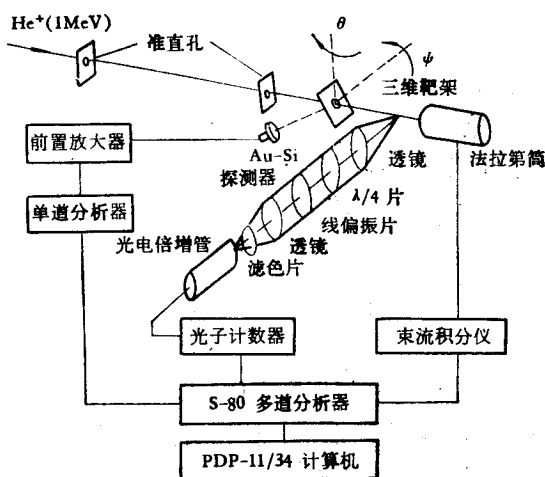
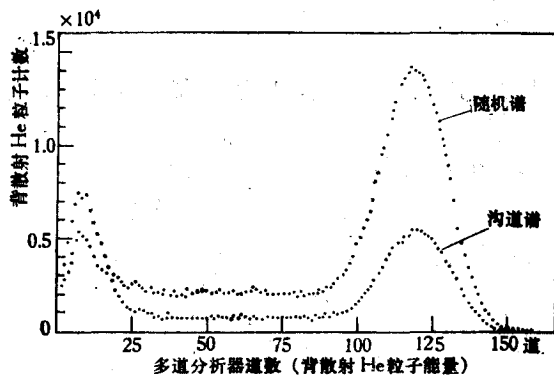
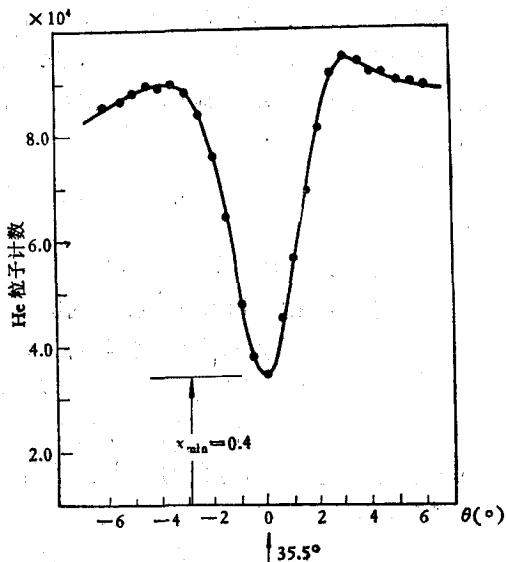


图 1 测量束箔离子发光 Stokes 参数的实验装置

实验结果及讨论

1MeV He^+ 对单晶金箔的背散射能谱见图 2。下面计数较少的一条曲线为沿 $\langle 110 \rangle$ 晶轴方向入射时测到的背散射谱, 上面一条曲线相应于随机方向。可以看到沿着晶轴方向入射和随机方向入射之间在计数上有明显差别, 这反映了 He^+ 离子和晶箔内 Au 原子碰撞的程度有明显不同。从图 2 上看出金箔厚度是适中的, 在 He^+ 穿出箔后仍有数百 keV 的能量。

图2 $\langle 110 \rangle$ 方向和随机方向图3 He^+ 对 Au 单晶箔背散射的 $\langle 110 \rangle$ 轴沟道坑
计数窗选在金箔出射表面

选择单道分析器甄别阈,以使所有经过金箔出射表面散射的 He 原子核全部包括进来,以测量沟道坑曲线。使用类似于 Andersen 的方法^[21],寻找 Au 单晶的 $\langle 110 \rangle$ 轴,然后在轴附近改变 θ 角测量 He 的背散射计数,得到的沟道坑如图 3 所示。我们看到一个十分明显的 $\langle 110 \rangle$ 轴沟道坑。图 3 表明了 $\chi_{\min} = 0.4$, 还不够小,这是由于金箔还不够薄的缘故。剥离和安装较薄的金箔,在技术上还很不容易做到。但现在坑的深度对本实验已可以了。本实验感兴趣的是穿透了全部金箔经最后一层表面射出的氦束,离子沿晶轴方向或沿随机方向在体内对称性有质的差别。实验上,相应选取图 3 中箔倾斜角 θ 在沟道坑底部及坑边缘平坦处,测量 Stokes 参数,以确定两种情况的极化度。

用以测定 Stokes 参数的偏振光光强公式为^[22]

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

其中 α 为线偏振片轴的幅角 ($\alpha = 0$ 时,轴处于水平方向,与束平行), β 为 $\lambda/4$ 片快轴的幅角。对 $\lambda/4$ 片,相移 $\delta = 90^\circ$ 。 I, M, C, S 为四个 Stokes 参数。极化度,即相对值 S/I 描述了离子角动量取向的情况。

本实验将线偏振片轴固定放置在 $\alpha = -45^\circ$ 处,转动 $\lambda/4$ 片快轴,测量光强 I 随 β 的变化。使用 S-80 作多定标测量,在 CRT 上直接显示了 $I(-\pi/4, \beta, \pi/2)$ 曲线,如图 4 所示。上面一条曲线反映 He^+ 束沿 $\langle 110 \rangle$ 轴方向穿透金箔时,波长 $\lambda = 4686 \text{ \AA}$ 光的光强随 β 角的变化情况;下面一条对应随机方向入射的光强与 β 的函数关系。为了保证测量的精度,每一点计数积累到 $7-8 \times 10^4$ 个光子。

本实验使用 PDP-11/34 计算机对图 4 上两条曲线用上面所引的 $I(\alpha, \beta, \delta)$ 公式进

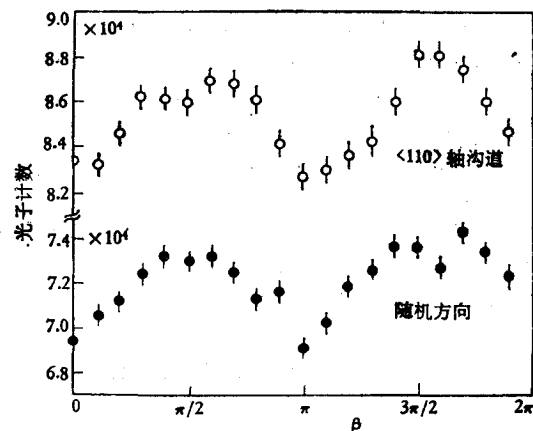


图 4 极化离子束退激时所发射偏振光的 Stokes 参数测量, 光强随四分之一波长片方位角的变化

表 1 He^+ 离子沿金单晶<110>轴和随机方向透过后测到的 Stokes 参数

Stokes 参数	<110>方向	随机方向
S/I	$(2.65 \pm 0.27)\%$	$(2.62 \pm 0.27)\%$
M/I	$(0.18 \pm 0.53)\%$	$(0.93 \pm 0.52)\%$
C/I	$(0.94 \pm 0.53)\%$	$(0.18 \pm 0.52)\%$

行函数拟合, 得到两组 Stokes 参数 S/I , M/I , C/I 及误差, 列于表 1 中。

为了使单晶箔的辐射损伤较小, 箔的寿命足够长, 实验中使用的 He^+ 束流强度为 50 nA 左右。尽管光强较弱, 但只要计数积累时间足够长, 仍能使统计误差为 $\pm 0.4\%$ 左右。本实验得到的 S/I 精度为 $\pm 10\%$, 比 Tolk 的结果提高了二至三倍。

实验结果表明 He^+ 离子极化度在沟道方向和随机方向几乎一致。这就表明离子角动量取向主要来自于表面相互作用, 在体内即使能产生, 亦不能带至表面。

在固定箔倾斜角度 ϕ 情况下, 实验得到 $\sqrt{S^2 + M^2 + C^2}/I$ 为常数, 与离子束入射到晶体的方向是沿晶轴还是随机方向无关, 这和 Eck 的理论模型^[16]的结果也是一致的。

郁瑛、万新农、李元园和沈元华同志为本工作制备了单晶金箔, 作者谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] H. G. Berry *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **32** (1974), 751.
- [2] H. J. Andrä *et al.*, *Z. Phys. A*, **281** (1977), 15; *Hyp. Int.* **5** (1978), 403.
- [3] M. Hass *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **38** (1977), 218.
- [4] R. M. Schectman *et al.*, *Phys. Rev. A*, **22** (1980), 1591.
- [5] B. I. Deutch *et al.*, *Proc. Int. Conf. on Nucl. Phys. Abstract* 659 (1980), Berkeley.
- [6] 汤家镛、陆福全, B. I. Deutch, *Phys. Rev. C*, **25** (1982), 1476; *N. I. M.*, **202** (1982), 215.
- [7] B. I. Deutch, 刘崇恒、陆福全、孙昌年、汤家镛、汤国魂、徐克琦、杨福家、叶慧, *原子核物理*, **2** (1980), 205.
- [8] U. Fano and J. H. Macek, *Rev. Mod. Phys.*, **45** (1973), 553.

- [9] T. Gay and H. G. Berry, *Phys. Rev. A*, **19**(1979), 925.
- [10] H. J. Andrä, *et al.*, *J. Phys. (Paris), colloq.* **41**(1979), C1-275.
- [11] H. Schröder and E. Kupfer, *Z. Phys. A*, **279** (1976), 13.
- [12] N. H. Tolk, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **41**(1978), 643.
- [13] J. Burgdöfver *et al.*, *Z. Phys. A*, **295** (1980), 7.
- [14] E. Lewis and J. D. Silver, *J. Phys. B*, **8**(1975), 2697.
- [15] Y. B. Band, *Phys. Rev., A*, **13** (1976), 2061.
- [16] T. G. Eck, *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974), 1055.
- [17] M. Lombardi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **35** (1975), 1172.
- [18] J. Linhard, *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, **34** (14) (1965).
- [19] N. H. Tolk, L. C. Feldman and G. Temmer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **47** (1981), 487.
- [20] 孙昌年、叶 慧、葛启云、汤国魂, *物理*, **10**(1981), 479.
- [21] J. U. Andersen *et al.*, *N. I. M.*, **38** (1965), 210.
- [22] H. G. Berry, *Appl. Optics*, **16** (1977), 3200.

STUDY ON THE POLARIZATION MECHANISM OF THE BEAM-FOIL INTERACTION IONS BY USING THE CHANNELING EFFECT

TANG JIA-YONG GE QI-YUN LU FU-QUAN SUN CHANG-NIAN WENG TAI-MENG

YANG JIAN-JUN YE HUI YANG FU-JIA

(Fudan University)

ABSTRACT

In order to provide an experimental evidence for the controversial polarization mechanism of the beam-foil ions, He^+ ions with energy of 1 MeV have been used to pass through a single crystal gold foil along the $\langle 110 \rangle$ direction and random direction, and the Stokes parameters of HeII 4686 Å $4f \rightarrow 3d$ transition have been accurately measured.