第 55 卷 第 9 期 2006 年 9 月
1000-3290/2006/55(09)/4520-08

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.55,No.9,September,2006

氧离子激发光谱的精密测量*

杨治虎[1)†] 张小安[1)2)] 赵永涛[1)] 殷纬纬[1)] 李宁溪[1)]

1)(中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)

2)(咸阳师范学院物理系,咸阳 712000)

(2006 年 1 月 24 日收到;2006 年 2 月 23 日收到修改稿)

在 2×1.7 串列加速器上利用束-箔方法和装有 CCD 的 Spectrapro-500i 光谱单色仪的测量装置,在 2 MeV 束能下研究了 250 nm—350 nm 波长范围离化态氧原子光谱.在 250 nm—350 nm 范围已确定的 201 条光谱线,确定的跃迁大部分属于 OⅡ 到 OⅣ原子的 n,l 能级间的跃迁,一些实验结果与现有理论一致.实验发现,在这个范围的光谱大都属于弱跃迁谱线,并且许多谱线是以前没有观测到的.

关键词:串列加速器,氧离子,CCD,光谱

PACC:3220J,3450H,3220R,3220N

1.引 言

在由各种元素按其宇宙丰度组成的星际天体中,发射光谱提供了一种极为独特的等离子体诊断方法,可以用来弄清多重电离物质和中性物质的关系,对中性物质提供直接度量,可以给出关于电离源的独特信息.天体物质的主要成分是 H,He,随着观测水平的提高,对 O,Al,Mg,Fe 等含量比较丰富的元素的研究越来越有意义.用传统的光谱技术无法模拟天体上的激发条件,也就无法获得来自空间的谱线,用束箔光源可以模拟天体(如太阳)的高温激发条件,使得人们来了解从天体上观察到的谱线.过去,在波长范围 270 nm—660 nm 的氧元素的束-箔光谱观测是 Bashkin 等人利用 1 和 2 MeV 的束能进行的[1,2].后来,Hallin 等人利用较高的束能,观测到了 OⅤ-OⅧ 许多能级跃迁[2,3].以前的这些观测都是用带有光电倍增管的光谱仪装置进行研究的,观测和研究谱线非常有限,而且分辨最好 0.1—0.15 nm.在这个工作中 我们使用高分辩的光谱仪,采用了现代 CCD (charge couple devive)纪录束箔光谱,250 nm—350 nm 范围观测到了以前没有观测到许多能级和谱线,这些能级跃迁谱线大多数都是强度弱的谱线,在一定程度上,用以前测量装置要观测到这些谱线是很困难的,这除了分辨差,主要原因是量子产额低,噪声高.这次实验观测到能级跃迁强度弱的谱线,是因为光谱仪分辩高,CCD 探测器量子产额高,噪声低.因为 CCD 具有多道功能,极大地缩短了实验测量时间,而且非常有利用于弱光的研究[4].本实验利用带有 CCD 的高精度光谱仪在 250 nm—350 nm 范围测量到许多弱谱线跃迁,是对 O 原子能级跃迁的一些空白实验数据的补充.这对于 O 原子结构本身的研究和天体中光谱线的确定是很有意义.

2.实验装置和测量方法

实验在兰州大学 2×1.7 串列加速器上完成.实验测量过程中,加速器引出 2 MeV 氧离子进入靶室,经过 3.0 mm 活动光栏,然后射向靶箔,离子穿过靶箔的束流由法拉弟筒接收,法拉弟筒接收的束流用作对寿命曲线归一测量.靶箔装在可转动的靶盘上,靶盘上共有直径为 4 mm 的 36 个靶孔,为测量和观测束流方便起见,在靶盘上只安装 18 片靶箔,并由光电信号系统定位靶箔与准直,图 1 表示实验测量系统[5].本实验测量使用的是美国 ARC 公司(Acton Research Corporation)生产的 Spectrapro-500i 光谱单色仪,其光栅为 1200 g/mm,波长扫描范围为 185 nm—far infra-red,分辨率(10 μm 435.8 nm)0.05 nm,色散

* 国家自然科学基金(批准号:10375080,10574132)和等离子体物理国家级科技重点实验基金(批准号:5148002010ZK5101)资助的课题.

† E-mail:z.yang@impcas.ac.cn

1.7 nm/mm. 实验测量中，将离开靶箔后离子束退激而发的光聚焦于与束流方向垂直的单色仪入射狭缝. 单色仪出射狭缝装有 CCD，CCD 和单色仪由控制器控制，操作计算机完成波长扫描和 CCD 纪录，整个测量过程在暗室完成. 实验中流强为 80 nA，碳靶箔厚度为 20 μg/cm^2. 测量过程中，通过调节加速器运行参数，在测量时间内，加速器束流保持不变. 实验发现，在测量时间内束流涨落的变化大约为 2%. 本工作选择单色仪扫描步长 3 nm，拍照时间为 60 s.

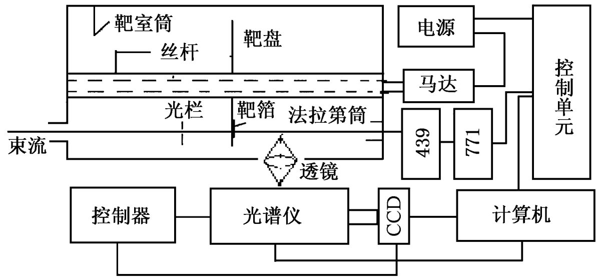

图 1　200—1000 nm 区实验测量装置示意图

表 1　本实验的分析结果

电离度	跃迁项	波长/nm		J_i-J_k
		本工作	文献理论[5]	
O Ⅴ	$2p(^2P^o)3s\ ^3P^o\ ^3P^o—2p(^2P^o)3p\ ^3P^o$	275.256	275.224	1—0
O Ⅳ	$2s^2(^1S_0)4d^2D—2s^2(^1S_0)5p\ ^2P^o$	275.904		3/2—1/2
O Ⅴ	$2p(^2P^o_{3/2})3s\ ^3P^o—2p(^2P^o_{3/2})3p\ ^3P$	276.949	276.969	2—1
O Ⅲ	$2s^2\ 2p(^2P^o)4p\ ^1P—2s^2\ 2p(^2P^o)5d\ ^1D^o$	277.190	277.204	1—2
O Ⅴ	$2s(^2S)3s^3S—2s(^2S)3p\ ^3P^o$	278.130	278.104	1—2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^4D—2s2p(^3P^o)3d\ ^4P^o$	278.197		1/2—1/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^4D—2s2p(^3P^o)3d\ ^4P^o$	278.677		1/2—3/2
O Ⅴ	$2s(^2S)3s^3S—2s(^2S)3p\ ^3P^o$	278.676	278.699	1—1
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^4D—2s2p(^3P^o)3d\ ^4P^o$	278.707	278.704	3/2—1/2
O Ⅴ	$2s(^2S)3s^3S—2s(^2S)3p\ ^3P^o$	278.924	278.986	1—0
O Ⅱ	$2s2p^4\ ^2P—2s^2\ 2p^2(^3P)4p\ ^2P^o$	278.966		3/2—1/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^4D—2s2p(^3P^o)3d\ ^4P^o$	279.262		3/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2\ 2p(^2P^o)3p\ ^3D—2s^2\ 2p(^2P^o)3d\ ^3P^o$	279.474	279.409	1—0
O Ⅱ	$2s2p^4\ ^2P—2s^2\ 2p^2(^3P)4p\ ^2P^o$	279.63		1/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2\ 2p^2(^3P)4s\ ^2P—2s^2\ 2p^2(^1D)4f\ P$	279.690		3/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2\ 2p(^2P^o)3p\ ^3D—2s^2\ 2p(^2P^o)3d\ ^3P^o$	279.881	279.901	1—1
O Ⅰ	$2s^2\ 2p^3(^4S^o)3p\ ^3P—2s^2\ 2p^3(^2D^o_{3/2})3d\ ^3S^o$	280.065		0—1
O Ⅳ	$2p^2(^3P)3p\ ^2D^o—2p^2(^1D)3d\ ^2F$	280.202		5/2—5/2
O Ⅱ	$2s2p^{42}P—2s^2\ 2p^2(^3P)4p\ ^2P^o$	280.317	280.311	1/2—1/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^4D—2s2p(^3P^o)3d\ ^4P^o$	280.336	280.360	5/2—3/2
O Ⅰ	$2s^2\ 2p^3(^4S^o)3p\ ^3P—2s^2\ 2p^3(^2D^o_{5/2})3d\ ^3D^o$	280.614		2—2
O Ⅰ	$2s^2\ 2p^3(^4S^o)3p\ ^3P—2s^2\ 2p^3(^2D^o_{5/2})3d\ ^3D^o$	280.668		2—3
O Ⅲ	$2s^2\ 2p(^2P^o)3p\ ^3D—2s^2\ 2p(^2P^o)3d\ ^3P^o$	280.723		1—2
O Ⅲ	$2s^2\ 2p(^2P^o)3p^3D—2s^2\ 2p(^2P^o)3d\ ^3P$	280.883	280.963	2—1
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3d\ ^2P^o—2s2p(^1P^o)3p\ ^2P$	281.014		3/2—1/2
O Ⅲ	$2s^2\ 2p(^2P^o)3p\ ^3D—2s^2\ 2p(^2P^o)3d\ ^3P^o$	281.833	281.868	2—2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3d\ ^2P^o—2s2p(^1P^o)3p\ ^2P$	282.242		1/2—1/2
O Ⅱ	$2s2p^{42}P—2s^2\ 2p^2(^3P)4p\ ^2D^o$	282.324		3/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^4D—2s2p(^3P^o)3d\ ^4P^o$	283.016	282.919	7/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)4f\ ^2D—2p^2(^1D)3p\ ^2D^o$	283.579		5/2—3/2

续表 1

电离度	跃迁项	波长/nm		J_i-J_k
		本工作	文献理论[6]	
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)3p\ ^3D-2s^2 2p(^2P^o)3d\ ^3P^o$	283.650	283.634	3—2
O Ⅳ	$2p^2(^3P)3p\ ^2S^o-2p^2(^3P)3d\ ^2P$	284.283		1/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)4p\ ^3D-2s^2 2p(^2P^o)5d\ ^3F^o$	284.899		3—4
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)4p\ ^3D-2s^2 2p(^2P^o)5d\ ^3F^o$	285.478	285.378	1—2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)4p\ ^3D-2s^2 2p(^2P^o)5d\ ^3F^o$	286.233	286.252	2—2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)4d\ ^2P^o-2p^2(^3P)3d\ ^2P$	286.609		3/2—1/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)4d\ ^2P^o-2p^2(^3P)3d\ ^2P$	287.803		1/2—1/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)4p\ ^3D-2s^2 2p(^2P^o)5d\ ^3F^o$	287.941	287.980	3—2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)4d\ ^2P^o-2p^2(^3P)3d\ ^2P$	288.020		3/2—3/2
O Ⅰ	$2s^2 2p^3(^4S^o)3p\ ^3P-2s^2 2p^3(^2D^o)3d\ ^3P^o$	288.387	288.378	2—2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[4]^o$	288.453		5/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[3]^o$	288.596		5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^1D)3d\ ^2F-2s^2 2p^2(^1D)5f\ G\ ^2[4]^o$	288.782		7/2—9/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[2]^o$	288.877		5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[4]^o$	289.157	3891.88	7/2—9/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[3]^o$	289.246		7/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ G\ ^2[5]^o$	289.738		7/2—9/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[4]^o$	289.967		9/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[4]^o$	290.078		9/2—9/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[3]^o$	290.122		9/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ G\ ^2[3]^o$	290.434		3/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p(^1P^o)3p\ ^2D-2s2p(^1P^o)3d\ ^2P^o$	290.487		3/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ G\ ^2[4]^o$	290.583	2905.00	5/2—7/2
O Ⅳ	$2s2p(^1P^o)3p\ ^2D-2s2p(^1P^o)3d\ ^2P^o$	290.758		5/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ G\ ^2[3]^o$	290.898	2908.74	3/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ D\ ^2[3]^o$	291.214		3/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ D\ ^2[3]^o$	291.557	2915.65	5/2—7/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^2P-2s2p(^3P^o)3d\ ^2D^o$	291.604	291.629	1/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4F-2s^2 2p^2(^3P)5f\ G\ ^2[4]^o)$	292.051		9/2—9/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)3p\ ^2P-2s2p(^3P^o)3d\ ^2D^o$	292.141	292.143	3/2—5/2
O Ⅳ	$2s^2(^1S_0)4f\ ^2F^o-2s2p(^1P^o)3p\ ^2D$	292.699		7/2—5/2
O Ⅳ	$2s^2(^1S_0)4f\ ^2F^o-2s2p(^1P^o)3p\ ^2D$	292.854		5/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)4d\ ^2F^o-2p^2(^3P)3d\ (^2F)$；	295.759		5/2—7/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)3p\ ^1P-2s^2 2p(^2P^o)3d\ ^1D^o$	295.946	295.974	1—2
O Ⅱ	$2s2p^{4}\ ^2P-2s^2 2p^2(^3P)4p\ ^4P^o$	296.430		3/2—1/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)4p\ ^2P^o-2s^2 2p^2(^1S)4s\ ^2S$	296.570		3/2—1/2
O Ⅰ	$2s^2 2p^{4}\ ^3P-2s^2 2p^{4}\ ^1S$	297.245		1—0
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2F-2s^2 2p^2(^1D)4p\ ^2F$	297.310		7/2—7/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^o)4d\ ^2F^o-2p^2(^3P)3d\ ^2F$	297.341		7/2—5/2
O Ⅱ	$2s2p^{4}\ ^2P-2s^2 2p^2(^3P)4p\ ^4P^o$	297.956		1/2—1/2
O Ⅳ	$2s^2(^1S_0)3d\ ^2D-2s2p(^3P^o)3s\ ^2P^o$	298.209		5/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)3s\ ^1P^o-2s^2 2p(^2P^o)3p\ ^1D$	298.382	298.378	1—2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4P-2s^2 2p^2(^3P)5f\ F\ ^2[2]^o$	299.188		3/2—5/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^o)3p\ ^3D-2s^2 2p(^2P^o)3d\ ^3D^o$	299.264	299.211	1—2

续表 1

电离度	跃迁项	波长/nm		$J_i—J_k$
		本工作	文献理论[5]	
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^1D)3d\ ^2G$—$2s^2 2p^2(^1D)5f\ H^2\ [5]^\circ$	299.566		7/2—9/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\ ^3D$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\ ^3D^\circ$	299.650	299.651	1—1
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [1]^\circ$	299.699		3/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\ ^3D$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\ ^3D^\circ$	299.787	299.771	2—3
O Ⅳ	$2s2p(^1P^\circ)3s\ ^2P^\circ$—$2s^2(^1S_0)5d\ ^2D$	299.970		1/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p(^1P^\circ)3s\ ^2P^\circ$—$2s^2(^1S_0)5d\ ^2D$	300.021		3/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p(^1P^\circ)3s\ ^2P^\circ$—$2s^2(^1S_0)5d\ ^2D$	300.097		3/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [2]^\circ$	300.129		5/2—5/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\ ^3D$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\ ^3D^\circ)$	300.445	300.435	2—2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ G^2\ [3]^\circ$	300.541		5/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ F^2\ [3]^\circ)$	300.772		7/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [2]^\circ$	300.841		3/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ F^2\ [2]^\circ$	300.927		3/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ F($—$^2\ [2]^\circ$	301.083		3/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D\ ^2F$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ F^2\ [3]^\circ$	301.158		5/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [3]^\circ$	301.389	301.337	5/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2F$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ F^2\ [2]^\circ$	301.416	301.4145	5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [1]^\circ$	301.581		3/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3d\ ^2P^\circ$— $2s2p(^1P^\circ)3p\ ^2D$	301.993		3/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [3]^\circ$	302.038		3/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2F$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ F^2\ [4]^\circ$	302.525	302.575	7/2—9/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2F$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ F^2\ [3]^\circ$	302.671		7/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [2]^\circ$	302.770		5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ G^2\ [4]^\circ$	302.891	302.882	7/2—9/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$— $2s2p^2(^4P)3d\ ^5P$	303.045		1—2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\ ^5P$	303.275		2—1
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2F$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ G^2\ [3]^\circ$	303.639		5/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [3]^\circ$	303.929	303.976	7/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^4D$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [3]^\circ$	303.991		7/2—7/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$—$2s^2 2p^2(^4P)3d\ ^5P$	304.299		2—3
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2F$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [3]^\circ$	304.399		5/2—7/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$— $2s2p^2(^4P)3d\ ^5P$	304.530		3—2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3p\ ^2P$—$2s^2(^1S_0)4p\ ^2P^\circ$	305.787		3/2—3/2
O Ⅴ	$2p(^2P^\circ_{3/2})3s\ ^1P^\circ$—$2p(^2P^\circ_{3/2})3p\ ^1D\ )$	305.853	305.868	1—2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2F$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [3]^\circ$	305.942		7/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3p\ ^2P$—$2s^2(^1S_0)4p\ ^2P^\circ$	306.178		3/2—1/2
O Ⅳ	$2s^2(^1S_0)3s\ ^2S$—$2s^2(^1S_0)3p\ ^2P^\circ$	306.343	306.346	1/2—3/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$— $2s2p^2(^4P)3d\ ^5D$	306.872	306.868	1—2
O Ⅳ	$2s^2(^1S_0)3s\ ^2S$—$2s^2(^1S_0)3p\ ^2P^\circ$	307.175	307.166	1/2—1/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\ ^5D$	308.369	308.365	3—3
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$— $2s2p^2(^4P)3d\ ^5D$	308.855	308.804	4—4
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [1]^\circ$	309.092		1/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\ ^2P$—$2s^2 2p^2(^3P)5f\ D^2\ [2]^\circ$	309.135		3/2—5/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\ ^5D^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\ ^5D$	309.595	309.581	4—3

续表 1

电离度	跃迁项	波长/nm		J_i-J_k
		本工作	文献理论[5]	
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^2P-2s^2 2p^2({}^3P)5f\,D^2\,[2]^\circ$	310.262		1/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^1D)3d\,{}^2P-2s^2 2p^2({}^1D)5f\,D^2\,[2]^\circ$	310.768		3/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3p\,{}^4D^\circ-2s^2 2p^2({}^3P)4s\,{}^4P$	311.387	311.371	3/2—5/2
O Ⅲ	$2s^2 2p({}^2P^\circ)3p\,{}^3S-2s^2 2p({}^2P^\circ)3d\,{}^3P^\circ$	311.524	311.573	1—0
O Ⅲ	$2s^2 2p({}^2P^\circ)3p\,{}^3S-2s^2 2p({}^2P^\circ)3d\,{}^3P$	312.149	312.171	1—1
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3p\,{}^4D^\circ-2s^2 2p^2({}^3P)4s\,{}^4P$	312.238	312.262	5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3p\,{}^4D^\circ-2s^2 2p^2({}^3P)4s\,{}^4P$	312.385	312.402	1/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p({}^1P^\circ)3p\,{}^2P-2s2p({}^1P^\circ)3d\,{}^2P^\circ)$	312.855		1/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3p\,{}^4D^\circ-2s^2 2p^2({}^3P)4s\,{}^4P$	313.054	312.944	3/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p({}^2P^\circ)3p\,{}^3S-2s^2 2p({}^2P^\circ)3d\,{}^3P$	313.279	313.286	1—2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3p\,{}^4D^\circ-2s^2 2p^2({}^3P)4s\,{}^4P$	313.459	313.432	1/2—1/2
O Ⅳ	$2s2p({}^1P^\circ)3p\,{}^2P-2s2p({}^1P^\circ)3d\,{}^2P^\circ$	313.723		3/2—1/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3p\,{}^4D^\circ-2s^2 2p^2({}^3P)4s\,{}^4P$	313. 805	313.844	5/2—3/2
O Ⅳ	$2p^2({}^1D)3s\,{}^2D-2p^2({}^1D)3p\,{}^2D^\circ$	314.147	314.167	3/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p({}^3P^\circ)3p\,{}^2D-2s2p({}^3P^\circ)3d\,{}^2P^\circ$	315.334		3/2—1/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^1S)3s\,{}^2S-2s^2 2p^2({}^3P)5p\,{}^2P^\circ$	315.579		1/2—1/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^2D-2s^2 2p^2({}^3P)5f\,F^2\,[2]^\circ$	316.739		3/2—5/2
O Ⅴ	$2s({}^2S)5f\,{}^3F^\circ-2s({}^2S)6g\,{}^3G$	316.814		3—4
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^2D-2s^2 2p^2({}^3P)5f\,F^2\,[3]^\circ$	316.979	316.9893	5/2—7/2
O Ⅴ	$2s({}^2S)5f\,{}^1F^\circ-2s({}^2S)6g\,{}^1G$	317.677		3—4
O Ⅳ	$2s2p({}^3P^\circ)3p\,{}^4D-2s2p({}^3P^\circ)3d\,{}^4D^\circ$	318.525	318.572	3/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^2D-2s^2 2p^2({}^3P)5f\,D^2\,[2]^\circ$	318.768		3/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p({}^3P^\circ)3p\,{}^4D-2s2p({}^3P^\circ)3d\,{}^4D^\circ$	318.815		5/2—7/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^2D-2s^2 2p^2({}^3P)5f\,G^2\,[3]^\circ$	319.223		3/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p({}^3P^\circ)3p\,{}^4D-2s2p({}^3P^\circ)3d\,{}^4D^\circ$	319.461	319.475	5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^2D-2s^2 2p^2({}^3P)5f\,G^2\,[3]^\circ$	319.772		5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^2D-2s^2 2p^2({}^3P)5f\,D^2\,[3]^\circ$	320.0721		3/2—5/2
O Ⅲ	$2s2p^2({}^4P)3p\,{}^3D^\circ-2s2p^2({}^4P)3d\,{}^3D$	320.141	320.095	1—1
O Ⅲ	$2s2p^2({}^4P)3p\,{}^3D^\circ-2s2p^2({}^4P)3d\,{}^3D$	320.749	320.712	2—2
O Ⅳ	$2s2p({}^1P^\circ)3s\,{}^2P^\circ-2s2p({}^1P^\circ)3p\,{}^2P$	320.984		3/2—3/2
O Ⅲ	$2s2p^2({}^4P)3p\,{}^3D^\circ-2s2p^2({}^4P)3d\,{}^3D$	321.021		2—1
O Ⅱ	$2s2p^3({}^5S^\circ)3p\,{}^6P-2s2p^3({}^5S^\circ)4s\,{}^6S^\circ$	321.634	321.676	5/2—5/2
O Ⅴ	$2p({}^2P^\circ_{1/2})3p\,{}^3D-2p({}^2P^\circ_{3/2})3d\,{}^3P^\circ$	322.727		1—1
O Ⅳ	$2s2p({}^3P^\circ)4p\,{}^2D-2p^2({}^3P)3p\,{}^2D^\circ$	323.688		3/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p({}^3P^\circ)4p\,{}^2D-2p^2({}^3P)3p\,{}^2D^\circ$	325.634		5/2—3/2
O Ⅲ	$2s2p^2({}^4P)3s\,{}^3P-2s^2 2p({}^2P^\circ)4d\,{}^3P^\circ$	325.784		0—1
O Ⅳ	$2p^2({}^3P)3p\,{}^4P^\circ-2p^2({}^3P)3d\,{}^4P$	325.842		1/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p({}^3P^\circ)4p\,{}^2D-2p^2({}^3P)3p\,{}^2D^\circ$	325.972		5/2—5/2
O Ⅲ	$2s^2 2p({}^2P^\circ)3p\,{}^3D-2s^2 2p({}^2P^\circ)3d\,{}^3F^\circ$	326.067	326.098	2—3
O Ⅳ	$2p^2({}^3P)3p\,{}^4P^\circ-2p^2({}^3P)3d\,{}^4P$	326.394		3/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p({}^2P^\circ)3p\,{}^3D-2s^2 2p({}^2P^\circ)3d\,{}^3F^\circ$	326.481	326.546	3—4
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3d\,{}^4F-2s^2 2p^2({}^3P)5p\,{}^2D^\circ$	327.567		5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2({}^3P)3p\,{}^4P^\circ-2s^2 2p^2({}^3P)4s\,{}^4P$	327.789	327.769	3/2—5/2
O Ⅲ	$2s^2 2p({}^2P^\circ)3p\,{}^3D-2s^2 2p({}^2P^\circ)3d\,{}^3F^\circ$	328.134	328.1831	2—2

续表 1

电离度	跃迁项	波长/nm		J_i-J_k
		本工作	文献理论[5]	
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3p\,^2S^\circ$—$2s^2 2p^2(^3P)3d\,^2D$	328.249		1/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\,^3D$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\,^3F^\circ$	328.447	328.457	3—3
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3s\,^3P$—$2s^2 2p(^2P^\circ)4d\,^3P^\circ$	328.681		2—1
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3s\,^3P$—$2s^2 2p(^2P^\circ)4d\,^3P^\circ$	328.773		2—2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3p\,^4P^\circ$—$2s^2 2p^2(^3P)4s\,^4P$	328.956		1/2—3/2
O Ⅴ	$2p(^2P^\circ_{3/2})3p\,^3D$—$2p(^2P^\circ_{3/2})3d\,^3P^\circ$	329.713	329.8	3—2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3s\,^3P^\circ$—$2s2\ 2p(^2P^\circ)3p\,^3S$	329.933	3299.36	0—1
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3p\,^2D$—$2s^2(^1S_0)4f\,^2F^\circ$	330.328		5/2—5/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3p\,^4P^\circ$—$2s^2 2p^2(^3P)4s\,^4P$	330.536	330.515	5/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3s\,^3P^\circ$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\,^3S$	331.234	331.230	1—1
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\,^5P$	332.688	332.616	1—1
O Ⅰ	$2s^2 2p^3(^4S^\circ)4p\,^3P$—$2s^2 2p^3(^2D^\circ_{5/2})4d\,^3D$	332.982		1—1
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3s\,^5P$—$2s2p^2(^4P)3p\,^5P$	333.022	333.040	1—2
O Ⅰ	$2s^2 2p^3(^4S^\circ)4p\,^3P$—$2s^2 2p^3(^2D^\circ_{5/2})4d\,^3D^\circ$	333.144		2—3
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\,^5P$	333.262	333.249	2—1
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3s\,^5P$—$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$	333.626	333.678	1—1
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3s\,^3P^\circ$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\,^3S$	334.040	334.0765	2—1
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3s\,^5P$—$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$	334.360	334.426	2—2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3s\,^2P^\circ$—$2s2p(^3P^\circ)3p\,^2D$	334.812	334.806	1/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\,^4F$—$2s^2 2p^2(^3P)5p\,^4D$	335.124		5/2—7/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3p\,^4S$—$2s2p(^3P^\circ)3d\,^4P^\circ$	335.429	335.434	3/2—1/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\,^4F$—$2s^2 2p^2(^3P)5p\,^4D^\circ$	335.969	336.015	7/2—7/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3s\,^5P$—$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$	336.236	336.238	3—2
O Ⅳ	$2p^2(^3P)3s\,^4P$—$2p^2(^3P)3p\,^4P^\circ$	336.388		1/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^3P)3d\,^4F$—$2s^2 2p^2(^3P)5p\,^4D^\circ$	336.678	336.6723	5/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3p\,^4S$—$2s2p(^3P^\circ)3d\,^4P^\circ$	337.536	337.550	3/2—5/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3s\,^4P^\circ$—$2s2p(^3P^\circ)3p\,^4D$	338.124	338.121	3/2—5/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\,^5D$	338.253	338.2612	2—3
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\,^5D$	338.376	338.385	2—2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\,^5D$	338.487	338.495	3—4
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3s\,^4P^\circ$—$2s2p(^3P^\circ)3p\,^4D$	338.565	338.555	5/2—7/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3p\,^5P^\circ$—$2s2p^2(^4P)3d\,^5D$	339.552	339.5428	3—2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3s\,^4P^\circ$—$2s2p(^3P^\circ)3p\,^4D$	339.686	339.683	3/2—3/2
O Ⅳ	$2s2p(^3P^\circ)3s\,^4P^\circ$—$2s2p(^3P^\circ)3p\,^4D$	340.595	340.597	3/2—1/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\,^3P$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\,^3P^\circ$	340.677		0—1
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^1D)3p\,^2D^\circ$—$2s^2 2p^2(^1D)4s\,^2D$	340.740	340.738	5/2—3/2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\,^3P$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\,^3P^\circ$	340.805	340.813	1—0
O Ⅳ	$2s^2(^1S_0)3p\,^2P^\circ$—$2s^2(^1S_0)3d\,^2D$	341.393	341.371	3/2—3/2
O Ⅱ	$2s^2 2p^2(^1S)3p\,^2P^\circ$—$2s^2 2p^2(^1S)4s\,^2S$	342.083		3/2—1/2
O Ⅲ	$2s2p^2(^4P)3s\,^3P$—$2s^2 2p(^2P^\circ)4d\,^3D^\circ$	342.738		1—2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\,^3P$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\,^3P^\circ$	342.873	342.867	1—2
O Ⅲ	$2s^2 2p(^2P^\circ)3p\,^3P$—$2s^2 2p(^2P^\circ)3d\,^3P^\circ$	343.019	343.060	2—1

3. 实验结果与讨论

图 2 是本实验测量的 2 MeV 束能下 250—350 nm 范围的部分光谱. 表 1 列出 250—350 nm 范围的分析结果.

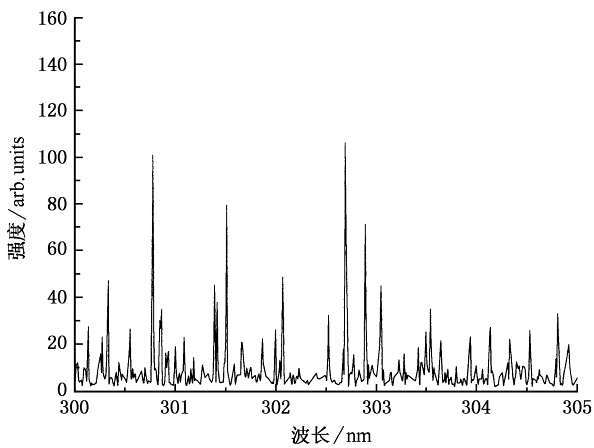

图 2 2 MeV 束能下 250 nm—350 nm 部分实验测量图

实验分析认为,大约为 2% 束流涨落对本实验设置的测量时间内测量到的光谱影响很小. 在光谱分析采用 Gaussian 拟合确定光谱中心,用精确已知的谱线建立若干条谱线作为标准线,通过二次多项式修正光栅色散方程,用最小二乘法拟合标准谱线波长,由谱线位置标定测量到的所有谱线波长. 电荷态分布和跃迁能级由计算和文献参考结果,以及 NBS(nationnal bureau of standards)数据确定.

电荷态采用下面的数学形式估算[7]:

$$\bar{q} = Z\left\{\left[\frac{0.067MZ^{0.9}}{E}+1\right]\right\}^{-0.6}, \quad (1)$$

式中 Z 是入射离子的原子序数,E 是入射束能量,M 是入射离子的质量数,$\bar{q}$ 是入射离子束通过碳箔后的平均电荷态. 通过箔的出射离子的电荷态分布 $F(q)$ 近似为 Gauss 分布,即

$$F(q) = (2\pi d^2)^{-1/2}\exp[-(q-\bar{q})^2/2d^2, \quad (2)$$

式中 d 为分布宽度,

$$d = 0.5\{\bar{q}[1-(\bar{q}/Z)^{-1/0.6}]\}^{1/2}. \quad (3)$$

估算结果与文献参考和 NBS 结果一致,实验测量谱线的电荷态主要是 O Ⅳ(O^{3+}),O Ⅲ(O^{2+})和 O Ⅱ(O^{1+}). 电荷态分布与 Cowan 程序一致. 本实验测量与理论预言计算符合得较好. 实验结果不可靠性为 ±0.001 nm,与理论预言波长之间的差没有超过 ±0.05 nm. 光谱分辨为 0.02 nm,比以前的实验测量[1,2]提高了一个多数量级. 表 1 中给出本实验确定的跃迁和波长,在这些跃迁中只有电荷态 O Ⅲ 的 $2s^2\,2p(^2P^o)3s\ ^1P^o-2s^2\,2p(^2P^o)3p\ ^1D$ 和 $2s2p^2(^4P)3p\ ^5P^o-2s2p^2(^4P)3d\ ^5D$ 的跃迁、其波长分别为 298.382 和 338.487 的结果在文献中有报道[7].

4. 结 论

氧离子、原子在波长 200—600 nm 范围做了不少的实验研究,理论上有较多的数据. 过去的氧元素的原子光谱的实验测量基本上属于较强、或强谱线的跃迁研究,弱谱线跃迁测量和研究很少. 带有 CCD 的高精度光谱仪在弱谱线跃迁测量中是非常有用的实验装置,可发现新的能级和跃迁谱线,填补新的实验数据.

[1] Bashkin S, Fink D, Malmberg P R *et al* 1966 *J. Opt. Soc. Am.* **56** 1064

[2] Pinningto E H 1970 *Nucl. Instr. and Meth.* **90** 93

[3] Hallin R, Lindskog J, Marelius A, Pihl. J *et al* 1973 *Physica Scripta* **8** 209

[4] Ishii K, Kink I, Engströ L, Martinson I 1999 *Physica Scripta* T**80** 448

[5] Yang Z H, Du S B, Zeng X T *et al* 2005 *Chinese Physics* **14** 953

[6] Стрганов А Р 1966 *СВЕНТИЦКИЙНС Atom spectra data table* (Москва)

[7] Nikolaev V, Dimitriev I 1968 *Phys Lett.* **28**A 277

Precision measurement of excited spectra of oxygen ions*

Yang Zhi-Hu[1)†] Zhang Xiao-An[1)2)] Zhao Yong-Tao[1)] Yin Wei-Wei[1)] Li Ning-Xi[1)]

1)（*Institute of Modern Phsicas*，*Chinese Academy of Sciences*，*Lanzhou* 730000，*China*）

2)（*Xianyang Normal College*，*Xianyang* 712000，*China*）

（Received 24 January 2006；revised manuscript received 23 February 2006）

Abstract

Spectra of the ionized oxygen atom were researched with the Pro-500i monochromator equipped with CCD. The beam foil method was used at energy of 2 MeV in a 2 × 1.7 Tandem accelerator. In this work，we report 201 spectral lines determined in the region 250—350 nm，and most spectral lines were attributed to n，l energy level transitions from OⅡ to OⅣ atoms. Our experimental results are in good agreement with existing theoretical calculations. Many lines reported in this paper have not been measured in past experiments，and a majority of them are week transitional lines.

Keywords：tandem accelerator，oxygen ions，CCO，spectral lines

PACC：3220J，3450H，3220R，3220N

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China（Grant Nos. 10375080，10574132）and the National Key Laboratory of Laser Fusion，China（Grant No.5148002010ZK5101）.

† E-mail：z.yang@impcas.ac.cn