

电场中 Rydberg 原子的常数标度能谱方法

曹俊文^{1,2}, 柳晓军^{1,2}, 赵志¹, 詹明生¹

1. 中科院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071
2. 中科院安徽光学精密机械研究所激光光谱学开放实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 标度能谱理论能够简化外场谱及可以经典方法理解原子外场谱而倍受关注。本文报道了用于电场中 Rydberg 原子常数标度能谱实验研究的装置以及有关的计算机控制、采集及处理系统。该系统对能量 E 和电场 F 进行同步控制以保持标度能谱 $\epsilon = E/\sqrt{F}$ 为常数, 并成功地得到 Rydberg 态 Sr 原子在标度能 $\epsilon = -3.0$ 时的标度能谱。经过傅里叶变换, 获得了电场中 Sr 原子的电子回归谱。

关键词 标度能谱; 电子回归谱; Rydberg 态; Sr 原子

中图分类号: O433 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2002)01-0005-04

引言

外场中原子特性的研究一直是原子物理研究的前沿, 它涉及到原子物理和量子物理甚至整个物理学的许多基本问题。近十几年来, 随着高分辨激光光谱技术和电场、磁场高精度控制技术, 以及其他相关的技术如冷原子、超冷原子技术等的发展, 用于外场中原子研究的精确的常数标度能谱 (Scaled-energy spectroscopy) 方法, 甚至可以用来研究原子从规则向混沌运动的演变^[1]。

标度能谱的理论基础是: 当在标度坐标 (Scaled coordinate) 中考察系统的经典动力学时, 其哈密顿量不再单独地依赖于电场和能量, 系统的动力学行为完全依赖于一个唯一的参数——标度能 ϵ 。在原子单位下,

$$\epsilon = E/\sqrt{F}$$

如果在原子吸收谱实验中保持标度能 ϵ 恒定, 即同步地改变所加外电场及探测激光的波长, 便得到了常数标度能谱。对其进行傅里叶变换, 便得到相应的回归谱。它可以用半经典的闭合轨道理论 (Closed orbit theory) 来解释^[2,3]。闭合轨道是指电子从原子核附近出射后在外场、库仑势等的作用下重新返回到核附近而形成的轨道。回归谱中分立的共振峰与经典闭合轨道相对应。进而在经典轨道与量子力学谱之间建立了一种对应。

有关 Rydberg 原子 Stark 回归谱的研究已从简单的 H 原子体系扩展到类氢原子、碱金属原子以及碱土金属原子体系。在那些复杂的多电子体系中观察到了在 H 原子体系所观察

不到的有趣现象^[4-8]。对原子的 Stark 体系, 离子实的存在可能会诱导混沌, 导致电子动力学混沌行为, 为研究量子混沌提供了一种实在的体系^[6,7]。对于更为复杂的碱土金属原子的 Rydberg Stark 回归谱的研究将更具意义^{9,8}。Kips 等^[8]对 Ba 在场电离附近高激发态的电场标度能谱进行了实验研究, 用闭合轨道理论对实验傅里叶变换回归谱进行了很好的解释。

Sr 原子虽然与 Ba 原子类似, 同为碱土金属原子。但由于其量子亏损规律不一样而外场中的光谱呈现明显的差异^[9-11], 可以预料, 其外场动力学规律与混沌规律亦可能有特殊性。为了研究 Sr 原子的外场标度能谱, 我们建立了一套电场常数标度能谱测量装置并发展了相应的技术。用该方法获得了 Sr 原子电场常数标度能谱。本文则对装置、技术和结果进行了介绍和讨论。

1 实验装置

本实验采用激光束-原子束-外电场矢量相垂直的构型。实验控制系统如图 1 所示。脉冲 Nd:YAG 激光泵浦染料激光器 HD500 (染料为香豆素 440), 经 BBO 晶体倍频产生紫外光。紫外光经透镜聚焦, 进入真空系统的作用区 (作用区真空为 $2.7 \cdot 10^{-4}$ Pa)。Sr 原子由原子炉 (直热式, 加热电流为 115A 左右) 喷射出, 经过准直后, 在 Stark 电场极板中心处与紫外激光相互作用, 被激发形成 Rydberg 原子。Rydberg 原子继续飞行到下游的两块电离场板之间发生场电离, 得到的离子信号由通道电子倍增器 (CEM) 接收。

收稿日期: 2000-08-03, 修订日期: 2000-10-06

基金项目: 国家自然科学基金资助的课题 (批准号: 19774069, 19734006)

作者简介: 曹俊文, 1970 年生, 中科院安徽光学精密机械研究所博士生

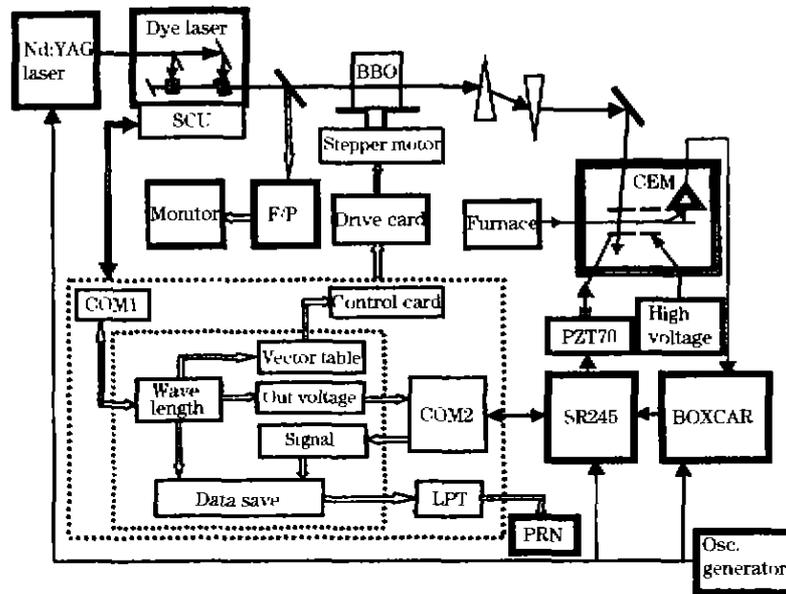


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

2 计算机控制模块

为得到高精度的常数标度能 e , 便要精确地获得所需的电子能量 E (即要考虑激光波长的扫描) 和相应的外电场 (即外加电压随波长的改变而做相应的变化), 同时还要考虑 Stark 电场极板间距的测量精度和激光线宽对其精度的影响。整个实验系统由计算机控制完成 (控制系统如图 1 所示)。计算机控制系统是 Sr 原子电场常数标度能谱实验的关键, 它包括多个控制子单元: 激光调谐控制单元、倍频晶体相位匹配控制单元、电场扫描控制单元、信号采集与处理单元以及其他辅助控制和监测单元等。实验过程中, 对各个部分需要进行实时定标、读取和扫描控制。对各控制单元分述如下。

2.1 激光调谐控制单元

激光线宽约为 4 GHz 左右, 波长的扫描控制, 是由 HD500 的扫描控制单元 SCU 来完成的。计算机通过 RS232 串口与 SCU 进行通讯 (信息流带校验码), 完成初始化、参数设置、扫描控制等功能。由于在实验中所需要的激光在紫外段 (218.5 nm 左右), 超出了染料激光器可调谐波段的覆盖范围, 需要用倍频晶体对染料激光器 HD500 产生的基频激光进行倍频。激光波长是通过 Sr 原子 $5s36p^1P_1$ 态的零场谱的对应波长进行精确定标。扫描过程中实时通过法布里-珀罗 (F/P) 干涉仪进行监测及校准。

2.2 倍频晶体相位匹配控制单元

为了得到较强的倍频光, 必须考虑 BBO 倍频晶体相位角与输入的基频激光波长的匹配问题。本实验是通过步进电机驱动光学平台旋转来实现倍频晶体相位角的微步调整。由于倍频晶体相位角与扫描波长匹配关系在理论上是较复杂的, 而且, 涉及到的初始参数很难测量。因此, 实际操作过程中, 每次光谱测量前测出激光波长对应的最佳位相匹配角的步数, 然后采用最小二乘拟合方法, 得到最佳位相匹配角时电机步数与激光波长的函数关系。同时, 由于染料使用寿命的

限制, 必须提高采样效率, 根据步进电机的矩频特性, 对步进电机进行了变速控制。

2.3 电场扫描控制单元

场极板间距可以通过 Stark 光谱数据标定。极板电压是影响控制精度的重要参数之一, 它由计算机控制 SR245 模块输出数字信号, 然后进行 D/A 转换, 再经过直流放大器 PZT70 放大后得到。根据直流放大器的放大系数, 对放大后的电压与计算机输出的信号进行回归拟合, 以保证计算机输出到极板上电压与当前要求的扫描电压是一一对应关系。整个过程中, 在低电压输出时控制精度可达 $\pm 0.0 \sim 0.3$ V (相对偏差可在 0.1% 范围内), 在高电压输出时, 相对偏差可在 0.2% 范围内。

2.4 信号采集与处理单元

由 CEM 得到的离子信号是非常弱的 (几毫伏 ~ 几十毫伏)。由于周围环境、激光强度不稳定等影响, 背景噪音信号比较大。在采取改善实验周边环境, 减小紫外激光强度起伏, 采用窄门宽取样等措施的同时, 还对 BOXCAR 选择较低的平均次数 (平均次数为 3 次)。而且, 在采样程序设计时, 对于每一个数据点, 采用较高的采样次数 (次数为 15 ~ 30 次), 然后利用中值数字滤波和算术平均值数字滤波等组合成复合数字滤波方法, 既保证了采样的灵敏度, 同时大大地提高了信噪比。最后, 数据由计算机保存, 进行后续的光谱数据处理。

2.5 其他控制与监测单元

包括原子束加热稳恒电流控制单元、法布里-珀罗干涉仪实时波长监测单元、倍频光光强监测单元等。

3 实验过程计算机控制与结果

实验过程中, 为了保持标度能为常数, 采用计算机同步控制染料激光器扫描波长和外加电压大小。计算机根据当前波长对染料激光器进行扫描控制, 使其调谐到对应位置; 驱动步进电机, 调整倍频晶体 BBO 相位匹配角; 调整控制极板上对

应电压输出信号;采集通道清零。在信号发生器产生的 10 Hz 方波同步脉冲信号作用下(沿触发方式),Nd:YAG 激光器产生脉冲光(355 nm)泵浦染料激光器,产生的基频光经过倍频,与基态 Sr 原子发生作用形成 Rydberg 原子,Rydberg 原子飞行到下游的电离场板间发生场电离(场电压 2.8 kV)。离子信号由 CEM 接收,经 BOXCAR 采样、平均。最后,由计算机通过 SR245 采集并经过数字滤波(每个数据点实际采样次数为 18 次),保存数据以及进行相关的数据处理。

BOXCAR 的门宽档设为 300 ns,门延迟为 100 μ s,平均采样次数为 3 次,染料激光输出波长在 436.4 ~ 437.4 nm 左右,经 BBO 倍频后,可将基态 Sr 原子激发到主量子数 $n = 25 \sim 35$ 范围的 Rydberg 态。电场扫描范围在 146 ~ 480 $V \cdot cm^{-1}$, $F^{-1/4}$ 的扫描范围在 77.00 ~ 57.00,扫描步长为 0.04 (F 以 $V \cdot cm^{-1}$ 为单位),相对应的波长扫描步长在 0.000 9 nm 左右。线偏振紫外激光的偏振方向垂直于电场方向,根据选择定则 $\Delta m = \pm 1$,激发末态磁量子数为 $|m| = 1$ 。这样,得到电场标度能 $\epsilon = -3.0$ 时 Sr 原子吸收能谱如图 2 中所示(横坐标表示电子的能量)。通过对实验谱图以 $F^{-1/4}$ 为变量进行傅里叶变换,得到 Sr 原子回归谱如图 3 中 3a 所示(横坐标为 $F^{-1/4}$)。图 3 中 3b 给出了 H 原子半经典的闭合轨道理论计算结果,应用闭合轨道理论的详细有关计算和解释另有

报道^[1]。

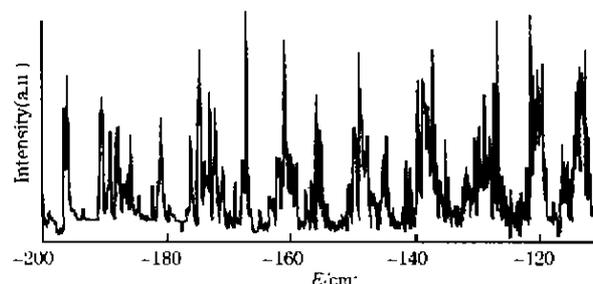


Fig. 2 Constant scaled energy spectrum of Sr atom ($\epsilon = -3.0$) in an electric field

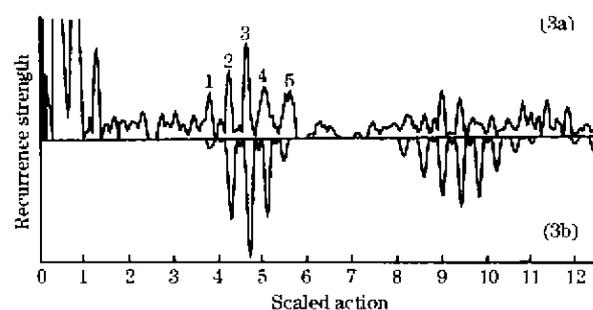


Fig. 3 The recurrence spectra of Sr atom ($\epsilon = -3.0$)

参 考 文 献

- [1] T F Gallagher Rydberg Atoms, Cambridge University Press 1994
- [2] M L Du, J B Delos. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(17):1731.
M L Du, J B Delos. *Phys. Rev. A*, 1988, **38**(4):1896; 1988, **38**(4):1913.
- [3] J Gao and J B Delos. *Phys. Rev. A.*, 1992, **46**(3):1455; 1994, **49**(2):869; 1997, **56**(1):356.
J Gao, J B Delos, M Baruch. *Phys. Rev. A.*, 1992, **46**(3):1449.
- [4] A Kips, W Vassen, W Hogervorst, and P A Dancu. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(4):3043.
- [5] U Eichmann, K Richter, D Wintgen, and W Sandner. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(21):2438.
- [6] M Courtney, H Jiao, N Spellmeyer, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(10):1340; 1995, **74**(9):1538.
- [7] M Keeler, T J Morgan. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(26):5726
- [8] A Kips, W Vassen, W Hogervorst. *J. Phys. B.*, 2000, **33**(1):109
- [9] J P Connerade, G Drozangas, N E Karapannagioti, and M S Zhan. *J. Phys. B*, 1997, **30**(1):2047.
- [10] J P Connerade, M S Zhan, J G Rao, and K T Taylor. *J. Phys. B*, 1999, **32**(10):2351.
- [11] LIU Xiao-jun, et al (柳晓军等), *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics* (原子与分子物理学报), 1998, **15**:215
- [12] LIU Xiao-jun, et al (柳晓军等), *Acta Physica Sinica* (物理学报) 2000, **49**(8):1447

Constant Scaled-energy Spectroscopy of Rydberg Atoms in a Static Electric Field

CAO Jun-wen^{1,2}, LIU Xiao-jun^{1,2}, ZHAO Zhi¹, and ZHAN Ming-sheng¹

1. State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2. Laser Spectroscopy Lab, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract In the past years, scaled energy spectroscopy is under active investigation because this method can simplify the analysis of atomic spectra in the external field based on classic mechanics. A fully computer-controlled experimental system to study the constant

scaled-energy spectroscopy was established and described in this paper. The excitation energy E and the strength of the external electric field F were controlled synchronously to keep the scaled-energy $\epsilon = E/\sqrt{F}$ constant. With this system, constant scaled-energy spectra of Strontium Rydberg atoms at $\epsilon = -3.0$ in a static electric field were successfully recorded for the first time, and the recurrence spectra were obtained by a Fourier transform.

Keywords Scaled energy spectroscopy; Recurrence spectrum; Rydberg; Strontium atom

(Received Aug. 3, 2000; accepted Oct. 6, 2000)

《光谱学与光谱分析》投稿简则

《光谱学与光谱分析》是由中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院承办的专业学术期刊。国内外公开发行,双月刊,大 16 开 128 页。《光谱学与光谱分析》主要报道我国光谱学与光谱分析领域内具有创新性科研成果,及时反映国内外光谱学与光谱分析的进展和动态;发现并培育人才;推动和促进光谱学与光谱分析的发展。为科教兴国和实现四个现代化服务。读者对象为从事光谱学与光谱分析的科研人员、教学人员、分析测试人员和科研管理干部。

栏目设置和要求

1. 研究报告 要求具有创新性的研究成果,一般文章以 8000 字(包括图表、参考文献、作者姓名、单位和中文、英文摘要,下同)为宜。
2. 研究简报 要求在前人研究的基础上有重大改进或阶段性研究成果,一般不超过 5000 字。
3. 评述与进展 要求评述国内外本专业的发展前沿和进展动态,一般不超过 10000 字。
4. 新仪器装置 要求介绍新型光谱仪器的研制、开发、使用性能和应用,一般不超过 5000 字。
5. 来稿摘登 要求测试手段及方法有改进并有应用交流价值,一般以 2000 字为宜。

稿件要求

1. 投稿者请经本刊编委一人或本专业知名专家推荐,并附单位保密审查意见及作者署名顺序,主要作者介绍。文章有重大经济效益或有创新者,请说明,同时注明受国家自然科学基金或省部级基金资助情况。
2. 来稿要观点明确、数据真实可靠、层次分明、言简意明、重点突出。来稿必须字迹清晰(含各种符号和外文字母大写、小写、正体、斜体;希腊字母、拉丁字母;上角、下角标位置应标清楚)。中文摘要以 300 字为宜,英文摘要以 1500 字符为宜;另附主题词。要求来稿应达到“齐、清、定”,中文、英文文字通顺,方可接受送审。
3. 来稿务请用 16 开稿纸誊写清楚,工整,一式两份。最好用计算机打印并附 3 寸软盘,请在盘上注明文章文件名(软盘上的文件最好转换成 .TXT 文件)。软盘不退,请勿一稿两投,一经发现一稿两投,作者要付本刊审校排费。
4. 文中插图请用墨笔精绘,插图黑白反差要大。坐标用铅笔准确标明,图幅大小:单栏图 7.5cm(长)×6cm(高);双栏图:14cm(长)×6cm(高);图中数字、图题、表题全部用中文、英文对照,图中数字、中文、英文全用 6 号字。在文中留出该图大小一致的空白(另请备一份合格的图附在文章的后边)。
5. 文中出现的单位必须按“中华人民共和国计量标准”及有关 GB 标准规定缮写。物理量符号一律用斜体,单位符号和词头用正体字母。
6. 名词术语,请参照全国科学技术名词规定缮写。
7. 参考文献,采用顺序编码制,只列主要文献;内部资料、私人通讯、未经公开发表的一律不能引用。日文、俄文等非英文文献,请用英文表述;中文文献采用中英文对照表述,文献缮写格式请参照本刊。

稿件处理

1. 自收到稿件之日起,三个月内作者会收到编辑部的录用通知。请根据录用通知中所提出的要求认真修改,希望修改稿在 40 天内寄回编辑部。若三个月内编辑部没收到修改稿,将视为自行撤稿处理。
2. 有重大创新并有基金资助者可优先发表;不录用的稿件编辑部将尽快通知作者同时退还稿件。
3. 来稿一经发表将酌致稿酬并送样书。
4. 遵照“中华人民共和国著作权法”,投稿作者须明确表示,该文版权(含各种媒体的版权)授权给编辑部。国内外各大文献检索系统免费摘录本刊刊出的论文;凡不同意被检索刊物无稿酬摘引者,请在投稿时事先声明,否则,本刊一律认为已获作者授权认可。
5. 来稿请寄 100081 北京海淀区魏公村学院南路 76 号,光谱学与光谱分析期刊社
电话:010 62182998 或 62181070
传真:010 62181070
E-mail chngpxygfpx@sina.com