

甘肃省大学生创新创业训练计划
项目申报表
(创新训练项目)

推 荐 学 校 :	西北师范大学 (盖章)
项 目 名 称 :	强激光场中原子产生高次谐波的动力学机制研究
所属一级学科名称:	物理学
项 目 负 责 人 :	丁壮伟
联 系 电 话 :	18009471440
指 导 教 师 :	李鹏程 王国利 赵松峰 周效信 焦志宏
联 系 电 话 :	13919298549
申 报 日 期 :	2018.04

甘肃省教育厅 制
二〇一八年四月

项目名称		强激光场中原子产生高次谐波的动力学机制研究					
项目所属一级学科		物理学					
项目实施时间		起始时间：2017 年 11 月 完成时间：2018 年 11 月					
项目简介 (100 字以内)		本项目将利用数值求解强场中含时薛定谔方程，对实验上关注原子在强场中产生高次谐波的动力学过程进行研究，包括分子不同轨道的电子产生高次谐波的相干和相位特性、量子路径的特点、多光子及隧穿电离的角色，优化控制原子高次谐波的产生，为 XUV 束的研究和应用提供支持。					
申请人或申请团队		姓名	年级	学号	所在院系/专业	联系电话	E-mail
	主持人	丁壮伟	2016 级	201672010103	物理学	18009471440	1823526113@qq.com
		宁飞	2016 级	201672010118	物理学	17361596244	956238794@qq.com
	成员	陈王欢	2016 级	201672010102	物理学	15117272934	2604316356@qq.com
		唐威	2016 级	201672010236	物理学	17393150616	1282533660@qq.com
		王岐岐	2016 级	201672010123	物理学	17361632301	1347296031@qq.com
指导教师	第一指导教师	姓名	李鹏程		单位	西北师范大学物理与工程学院	
		年龄	42 岁		专业技术职务	副教授	

	主要成果	科研项目： 1. 从头算研究强激光场中的分子低能高次谐波动力学过程，（批准号：11674268），国家自然科学基金，2017.1-2020.12. 2. 强激光场中原子分子产生的阿秒脉冲和电离特性研究（批准号：11047016），国家自然科学基金，2011.1-2013.12. 3. 基于含时密度泛函理论的多电子原子在中红外强激光场中的性质研究（批准号：11364039），国家自然科学基金，2014.1-2017.12. 获奖情况： 1. 强激光场中原子分子性质的研究，甘肃省教育厅科技进步二等奖(2010). 2. 原子分子在强激光场中的电离和高次谐波研究，甘肃省高校科技进步二等奖(2012). 3. 原子分子在强激光场中性质的理论研究，甘肃省自然科学三等奖(2012). 4. 强激光与物质相互作用的研究，甘肃省高校科学研究优秀成果二等奖(2015). 5. Hossein Z Jooya, Dmitry A Telnov, Peng-Cheng Li, and Shih-I Chu, "Investigation of the characteristic properties of high-order harmonic spectrum in atoms using Bohmian trajectories" 一文被 <i>J. Phys. B</i> 期刊评为 2015 年度 Highlights 论文。 响因子：2.925) 发表论文（部分）： [1] <u>Peng-Cheng Li</u> (李鹏程)*, Sheu, Yae-Lin Jooya, Hossein Z, Xiao-Xin Zhou, and Shih-I Chu*, "Exploration of laser-driven electron-multirescattering dynamics in high-order harmonic generation", <i>Scientific Reports</i>, 6, 32763 (2016). (二区, A1, 影响因子: 4.259) [2] <u>Peng-Cheng Li</u> (李鹏程)*, Yuan-Xiang Jiao, Xiao-Xin Zhou, and Shih-I Chu, "Role of quantum trajectory in high-order harmonic generation in the Keldysh multiphoton regime", <i>Optics Express</i>, 24, 13(2016). (二区, A1, 影响因子: 3.307) [3] <u>LI Peng-Cheng</u> (李鹏程)* and ZHOU Xiao-Xin, "Single ultrashort attosecond pulse generation via the combination of chirped fundamental laser and an ultraviolet controlling pulse", <i>Communications in Theoretical Physics</i>, 57, 445 (2012). (四区, A1, 影响因子: 0.989)
--	------	---

	第二指导教师	姓名	王国利	单位	西北师范大学物理与电子工程学院
		年龄	40 岁	专业技术职务	教授
	主要成果 科研项目： 1. 基于遗传算法的高次谐波优化和控制，国家自然科学基金项目（11364038），年限：2014.01-2017.12，主持； 2. 强激光场与原子相互作用的含时 R 矩阵理论研究，国家自然科学基金项目（11064013），年限：2011.01-2013.12，主持； 获奖情况： 1. 强激光与原子分子相互作用的研究，甘肃省教育厅，甘肃省高等学校科学研究优秀成果(自然科学类)二等奖，2015。 2. 原子分子在强激光场中性质的理论研究，甘肃省人民政府，甘肃省自然科学奖三等奖，2012。 3. 原子分子在强激光场中的电离和高次谐波研究，甘肃省教育厅，甘肃省高校科技进步二等奖，2012。 4. 强激光场中原子分子性质的研究，甘肃省教育厅，甘肃省高校科技进步二等奖，2010。 5. 原子、分子和离子的激发、电离和辐射性质的研究，甘肃省高等学校科技进步一等奖，2008 年 6. 指导 2009 高教社杯全国大学生数学建模竞赛获甘肃赛区二等奖 1 项，2009 年 发表论文：（from 2017） 1.Ling-Ling Du, Guo-Li Wang, Peng-Cheng Li, Xiao-Xin Zhou, and Zeng-Xiu Zhao , Interference effect in low-order harmonic generation of H+2 in intense laser fields, Phys. Rev. A 97, 023404 - Published 2 February 2018 2.王国利, 李鹏程, 李小勇, 赵松峰, 周效信, 原子发射高次谐波的优化控制和动力学分析, 中国科学: 物理学 力学 天文学, 47, 033002 (2017). 3.Guoli Wang, Jianjie Wan, Xiaoxin Zhou, Photoionization cross sections of the excited 3s3p 3Po state for atomic Mg, Radiation Physics and Chemistry, 130, 406 (2017). 4.Lei Zhang, Guo-Li Wang, Song-Feng Zhao, and Xiao-Xin Zhou, Controlling of strong tunable THz emission with optimal incommensurate multi-color laser field, Physics of Plasmas, 24, 023116 (2017).				

一、申请理由（包括自身具备的知识条件、自己的特长、兴趣、已有的实践创新成果等）

创新团队中，成员结构合理，其中本科生都是物理系专业学生。项目成员分工明确，这将会充分调动每个人的积极性，从而提高工作效率，这些都为项目研究提供了良好的基础条件。同时，科技创新团队中有多位指导老师，他们可以为项目的进行提供理论指导，为项目的顺利完成提供了重要保障。

二、项目方案

具体内容包括：

1.项目研究背景（国内外的研究现状及研究意义、项目已有的基础，与本项目有关的研究积累和已取得的成绩，已具备的条件，尚缺少的条件及方法等）

高次谐波辐射是强激光场与原子分子相互作用产生的一种非线性光学现象，利用它可以获得相干的、脉冲持续时间短的远紫外高频段相干辐射 XUV 和 X 射线光源，这种超强、超快激光光源的产生使人们有条件去研究原子分子中电子的运动过程，甚至去控制电子的运动，从而能够更加深入地认识原子分子的结构和性质。所以，对高次谐波辐射的研究是当前国际上一个非常活跃的前沿研究领域，且具有深远的科学意义和广阔的应用前景[1-15]。

高次谐波特征谱呈现独特的平台结构，即低阶谐波的强度快速下降，随后出现包括许多谐波阶次的平台，平台区域有一个快速下降的截止频率（Cutoff）。利用“经典三步模型”[16-17]可以解释高次谐波的产生：首先原子在激光场作用下，其中的电子隧穿由激光场和原子势共同形成的势垒而成为自由电子；接着隧穿后的自由电子将在激光场的驱动下加速运动并获得能量；最后当激光场反向时，电子被拉回原子核附近并与原子核复合，原子的电离能与电子从激光场获得的动能以光的形式辐射出来，所辐射光子的最大能量（截止频率）为 $I_p + 3.17U_p$ ，其中 I_p 是原子的电离势， U_p 是有质动力能（ $U_p = E_0^2 / 4\omega^2$ ，这里 E_0 是入射激光电场， ω 是激光的频率）。

参考文献：

- [1] E. Goulielmakis *et al.*, Real-time observation of valence electron motion, *Nature (London)* 436, 739 (2010).
- [2] E. Goulielmakis *et al.*, Single-cycle nonlinear optics, *Science* 320, 1614 (2008).
- [3] P. Colosimo, *et al.*, Scaling strong-field interactions towards the classical limit, *Nature Physics* 4, 386 (2008).
- [4] S. Baker *et al.*, Probing proton dynamics in molecules on an attosecond time scale, *Science* 312, 424 (2006).
- [5] M. Uiberacker *et al.*, Attosecond real-time observation of electron tunnelling in atoms, *Nature (London)* 446, 627 (2007).
- [6] M. Drescher *et al.*, Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy, *Nature (London)* 419, 803 (2002).
- [7] J. Itatani *et al.*, Tomographic imaging of molecular orbitals, *Nature (London)* 432, 867 (2004).

- [8] S. Haessler, Attosecond imaging of molecular electronic wavepackets. *Nature Phys.* **6**, 200-206 (2010).
- [9] Gaarde, M. B., Schafer, K. J., Heinrich, A., Biegert, J. & Keller, U. Large enhancement of macroscopic yield in attosecond pulse train-assisted harmonic generation. *Phys. Rev. A* **72**, 013411 (2005).
- [10] R. Kienberger *et al.*, Steering Attosecond Electron Wave Packets with Light, *Science* **297**, 1144 (2002).
- [11] M. Drescher *et al.*, Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy. *Nature* **419**, 803-807 (2002).
- [12] J. Henkel *et al.*, Prediction of attosecond light pulses in the VUV range in a high-order-harmonic-generation regime. *Phys. Rev. A* **87**, 043818 (2013).
- [13] E. J. Takahashi, P. Lan, O. D. Mücke, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, Attosecond nonlinear optics using gigawatt-scale isolated attosecond pulses. *Nat. Commun.* **4**, 2691 (2013).
- [14] T. Popmintchev *et al.*, Bright Coherent Ultrahigh Harmonics in the keV X-ray Regime from Mid-Infrared Femtosecond Lasers, *Science* **336**, 1287 (2012).
- [15] J. P. Marangos, High-harmonic generation: Solid progress, *Nature Physics* **7**, 97 (2011).
- [16] Corkum, P. B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization. *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993).
- [17] K. C. Kulander, K. J. Schafer, and J. L. Krause, in Proceedings of the Workshop on Super-Intense Laser Atom Physics (SILAP) III, edited by P. Piraux (Plenum Press, New York) 316, 95 (1993).

2. 项目研究目标及主要内容

2.1 研究内容:

2.1.1 基于数值求解强激光场中一维及二维含时薛定谔方程对实验上关注原子在强激光场中产生高次谐波的动力学过程进行研究, 强激光场中一维含时薛定谔方程如下所示:

$$i\frac{\partial}{\partial t}\psi(x,t)=\hat{H}(x,t)\psi(x,t)=[-\frac{1}{2}\nabla^2+V(x,t)]\psi(x,t)$$

强激光场中二维含时薛定谔方程如下所示:

$$i\frac{\partial}{\partial t}\psi(x,y,t)=\hat{H}(x,y,t)\psi(x,y,t)=[-\frac{1}{2}\nabla^2+V(x,y,t)]\psi(x,y,t)$$

通过精确数值求解以上方程可以获得高次谐波谱。

2.1.2 动力学分析: 利用经典轨道和时频分析方法对强激光场中产生高次谐波的动力学过程进行研究。

2.1.3 在二维含时薛定谔方程的基础上推广到三维。

2.2 项目目标:

2.2.1 数值求解强激光场中一维及二维含时薛定谔方程。

2.2.2 在二维含时薛定谔方程的基础上推广到三维。

3. 项目创新特色概述

利用含时伪谱方法 (TDGPS) 精确数值求解一维、二维含时薛定谔方程, 并结合经

典三步模型和时频分析方法，研究强激光场中原子产生高次谐波的动力学机制。

4.项目研究技术路线

用计算机的相关数学软件（Fortran, matlab 等）编程计算。

5.研究进度安排

（文献查阅）：2017 年 12 月至 2018 年 2 月

（方案设计）：2018 年 2 月至 2018 年 3 月

（实验研究）：2018 年 3 月至 2018 年 5 月

（数据处理）：2018 年 5 月至 2018 年 7 月

（撰写论文或研究报告）：2018 年 7 月至 2018 年 9 月

（结题和答辩）：2018 年 9 月至 2018 年 10 月

（项目鉴定）：2018 年 10 月至 2018 年 11 月

（成果推广或论文发表）：2018 年 10 月至 2019 年 5 月

6.项目组成员分工

姓名	项目中的分工
丁壮伟	数值分析
宁飞	程序编写
陈王欢	撰写论文
唐威	理论计算
王岐岐	数值分析

三、学校提供条件（包括项目开展所需的实验实训情况、配套经费、相关扶持政策等）

1. 西北师范大学开展的“创新能力提升计划”，提供了经费支持，为在校学生了解科学研究提供了良好的契机和平台；

2. 西北师范大学物理与电子工程学院的科技创新团队提供理论指导。

四、预期成果

发表相关科研成果 1-2 篇。

五、经费预算

总经费（元）	6500.00	财政拨款（元）	5000.00	学校拨款（元）	1500.00
--------	---------	---------	---------	---------	---------

注：总经费、财政拨款、学校拨款由学校按照有关规定核定数目进行填写

具体包括：

1、交通费：500.00 元；

2、用于项目研发的小型硬件购置费：3000.00 元；

3、资料购置费：2000.00 元；

4、打印、复印、印刷费：500.00 元；

5、其他费用：500.00 元。

六、导师推荐意见

该项目将利用含时伪谱方法 (TDGPS) 精确数值求解一维、二维含时薛定谔方程, 并结合经典三步模型 (Three-Step Model) 和时频分析方法, 研究强激光场中原子产生高次谐波的动力学机制, 研究目标明确, 研究内容详实, 研究方法合理, 研究方案切实可行, 具有一定的研究意义, 同意推荐。

签名: 李鹏程

王凤利, 赵松峰 同敬信 赵松峰

2018年4月26日

七、院系推荐意见

同意推荐

院系负责人签名:



学院盖章:



2018年4月27日

八、学校推荐意见:

同意推荐

学校负责人签名:



学校公章



2018年4月28日

注: 表格栏高不够可增加。