



《中国工程物理研究院科技丛书》第066号

强激光场中的 原子、分子与团簇

刘 杰 夏勤智 傅立斌 著



科学出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》 第 066 号

强激光场中的原子、 分子与团簇

刘 杰 夏勤智 傅立斌 著

科 学 出 版 社
北 京

内 容 简 介

超强超短激光脉冲的出现及其所带来的极端条件的研究,逐渐形成了一门新兴学科——强场物理学。强场物理既包括超强激光源的研究,同时也包含相对论区和非相对论区激光与原子、分子、团簇、固体及等离子体等的相互作用的研究。对这些领域的研究给许多其他学科(如实验室天体物理、材料科学、等离子体物理、激光核聚变、原子物理、非线性光学、相对论物理、激光物理、加速器物理、高能物理及其他许多应用学科)带来巨大冲击和机遇。这是一门内容非常丰富,同时在飞速发展的学科。在所有这些相关的研究领域中,强场与原子、分子的相互作用是理解强场与物质作用的基础。对这些问题的探索,有助于我们发展新的概念和方法,理解强场物理的基本图像,也有助于新的技术的出现,反过来推动强场物理的进步。因此,本书以强场中的原子、分子作为着重点,同时包括强场中的团簇的一些基本知识,介绍了强场物理中的基本概念和图像,同时还围绕著者多年的工作以及对相关问题的认识,对强场物理的若干前沿课题作了讨论。

本书适合物理及相关专业,特别是强场、原子分子、光学等方向的科研人员及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

强激光场中的原子、分子与团簇/刘杰,夏勤智,傅立斌著. —北京:科学出版社, 2014.1

(中国工程物理研究院科技丛书; 66)

ISBN 978-7-03-039689-1

I. ①强… II. ①刘… ②夏… ③傅… III. ①强场效应 IV. O482

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 020047 号

责任编辑: 钱 俊 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 2 月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 346 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 50 年来，坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向，完成了国家下达的各项国防科技任务。通过完成任务，在许多专业领域里，不论是在基础理论方面，还是在实验测试技术和工程应用技术方面，都有重要发展和创新，积累了丰富的知识经验，造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作，促进我院事业的继承与发展，系统地总结我院 50 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验，吸收国内外最新科技成果，形成一套系列科技丛书，无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果，内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科，也将编著出书，续入本丛书中。

这套丛书自 1989 年开始出版，在今后一段时期还将继续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍，经编委会审定后，也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 50 年来为我国国防现代化而献身的人们！

《中国工程物理研究院科技丛书》

编 审 委 员 会

2008 年 5 月 8 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》

第七届编审委员会

学 术 顾 问：杜祥琬

编委会主任：彭先觉

副 主 任：孙承纬 汪小琳 赵武文

委 员（以姓氏笔画为序）：

王 韬	帅茂兵	田 勇	李 凡	李正宏
李泽仁	李敬明	吴兴春	何建国	何宴标
张 凯	张 健	张文平	张方晓	张保汉
陈贤林	罗文华	孟凡宝	赵 峰	赵 强
赵小东	袁光伟	莫 军	黄秀光	彭述明
舒远杰	曾 超	魏晓峰		

科技丛书编辑部： 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》

公开出版书目

- | | | | |
|-----|--------------------------|---------|-------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编 | 科学出版社 | 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著 | 科学出版社 | 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 陈大年 编著 | 国防工业出版社 | 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法
胡家赣 著 | 科学出版社 | 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌
陈式刚 编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术 (上册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术 (下册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 著 | 国防工业出版社 | 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式的粘性
郭柏灵 著 | 科学出版社 | 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用
张俊哲 等 著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料的辐射效应
曹建中 等 著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |
| 012 | 炸药热分析
楚士晋 著 | 科学出版社 | 1993 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 等 著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度测量的方法和技术
古当长 著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 015 | 二维非定常流和激波
王继海 著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |

- | | | | |
|-----|-------------------------------|---------|-------------|
| 016 | 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南 著 | 科学出版社 | 1995 年 12 月 |
| 017 | 特种结构分析
刘新民 韦日演 编著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 018 | 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士 著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 019 | 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安 编著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 020 | 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金 编著 | 国防工业出版社 | 1997 年 01 月 |
| 021 | 近代成象技术与图象处理
吴世法 编著 | 国防工业出版社 | 1997 年 03 月 |
| 022 | 一维流体力学差分方法
水鸿寿 著 | 国防工业出版社 | 1998 年 02 月 |
| 023 | 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理
赖祖武 等 编著 | 国防工业出版社 | 1998 年 07 月 |
| 024 | 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭 云 编著 | 国防工业出版社 | 1998 年 12 月 |
| 025 | 实验核物理测量中的粒子分辨
段绍节 编著 | 国防工业出版社 | 1999 年 06 月 |
| 026 | 实验物态方程导引（第二版）
经福谦 著 | 科学出版社 | 1999 年 09 月 |
| 027 | 无穷维动力系统
郭柏灵 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 01 月 |
| 028 | 真空吸取器设计及应用技术
单景德 编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 01 月 |
| 029 | 再入飞行器天线
金显盛 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 03 月 |
| 030 | 应用爆轰物理
孙承纬 卫玉章 周之奎 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 031 | 混沌的控制、同步与利用
王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 032 | 激光干涉测速技术
胡绍楼 著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 033 | 气体炮原理及技术
王金贵 编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 034 | 一维不定常流与冲击波
李维新 编著 | 国防工业出版社 | 2001 年 05 月 |

- | | | | |
|-----|--|---------|-------------|
| 035 | X 射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文 编著 | 国防工业出版社 | 2001 年 08 月 |
| 036 | 含能材料热谱集
董海山 胡荣祖 姚 朴 等 编著 | 国防工业出版社 | 2001 年 10 月 |
| 037 | 材料中的氦及氘渗透
王佩璇 宋家树 编著 | 国防工业出版社 | 2002 年 04 月 |
| 038 | 高温等离子体 X 射线谱学
孙景文 编著 | 国防工业出版社 | 2003 年 01 月 |
| 039 | 激光核聚变靶物理基础
张 钧 常铁强 著 | 国防工业出版社 | 2004 年 06 月 |
| 040 | 系统可靠性工程
金碧辉 主编 | 国防工业出版社 | 2004 年 06 月 |
| 041 | 核材料 γ 特征谱的测量和分析技术
田东风 龚 健 伍 钧 等 编著 | 国防工业出版社 | 2004 年 06 月 |
| 042 | 高能激光系统
苏 毅 万 敏 编著 | 国防工业出版社 | 2004 年 06 月 |
| 043 | 近可积无穷维动力系统
郭柏灵 高 平 陈瀚林 著 | 国防工业出版社 | 2004 年 06 月 |
| 044 | 半导体器件和集成电路的辐射效应
陈盘训 著 | 国防工业出版社 | 2004 年 06 月 |
| 045 | 高功率脉冲技术
刘锡三 编著 | 国防工业出版社 | 2004 年 08 月 |
| 046 | 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著 | 国防工业出版社 | 2004 年 08 月 |
| 047 | 原子结构、碰撞与光谱理论
方泉玉 颜 君 著 | 国防工业出版社 | 2006 年 01 月 |
| 048 | 非牛顿流动力系统
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 | 国防工业出版社 | 2006 年 02 月 |
| 049 | 动高压原理与技术
经福谦 陈俊祥 主编 | 国防工业出版社 | 2006 年 03 月 |
| 050 | 直线感应电子加速器
邓建军 主编 | 国防工业出版社 | 2006 年 10 月 |
| 051 | 中子核反应激发函数
田东风 孙伟力 编著 | 国防工业出版社 | 2006 年 11 月 |
| 052 | 实验冲击波物理导引
谭 华 著 | 国防工业出版社 | 2007 年 03 月 |
| 053 | 核军备控制核查技术概论
刘成安 伍 钧 编著 | 国防工业出版社 | 2007 年 03 月 |

- | | | | |
|------------|--------------------------------|---------|-------------|
| 054 | 强流粒子束及其应用
刘锡三 著 | 国防工业出版社 | 2007 年 05 月 |
| 055 | 氙和氙的工程技术
蒋国强 罗德礼 陆光达 等 编著 | 国防工业出版社 | 2007 年 11 月 |
| 056 | 中子学宏观实验
段绍节 编著 | 国防工业出版社 | 2008 年 05 月 |
| 057 | 高功率微波发生器原理
丁武 著 | 国防工业出版社 | 2008 年 05 月 |
| 058 | 等离子体中辐射输运和辐射流体力学
彭惠民 编著 | 国防工业出版社 | 2008 年 08 月 |
| 059 | 非平衡统计力学
陈式刚 编著 | 科学出版社 | 2010 年 02 月 |
| 060 | 高能硝胺炸药的热分解
舒远杰 著 | 国防工业出版社 | 2010 年 06 月 |
| 061 | 电磁脉冲导论
王泰春 贺云汉 王玉芝 著 | 国防工业出版社 | 2011 年 03 月 |
| 062 | 高功率超宽带电磁脉冲技术
孟凡宝 主编 | 国防工业出版社 | 2011 年 11 月 |
| 063 | 分数阶偏微分方程及其数值解
郭柏灵 蒲学科 黄凤辉 著 | 科学出版社 | 2011 年 11 月 |
| 064 | 快中子临界装置和脉冲堆实验物理
贺仁辅 邓门才 编著 | 国防工业出版社 | 2012 年 02 月 |
| 065 | 激光惯性约束聚变诊断学
温树槐 丁永坤 等 编著 | 国防工业出版社 | 2012 年 04 月 |
| 066 | 强激光场中的原子、分子与团簇
刘杰 夏勤智 傅立斌 著 | 科学出版社 | 2014 年 02 月 |

前 言

光与物质的相互作用，是物理学研究的重要领域，也是人类认识世界的重要途径。特别是近年来，随着激光技术的飞速发展，激光的聚焦电场强度可以远远超过原子内部库仑场强，而且脉冲可以调控得越来越短，产生脉冲宽度达单周期量级的飞秒激光。这种极端光场与原子、分子和团簇等物质的相互作用问题，是一个具有挑战性的前沿基础科学问题。

人们将飞秒强激光场作用到各种形态的物质上，观测到了多光子电离、阈上电离、高次谐波和非顺序双电离等一系列有趣而奇异的现象。这些现象的发现将我们对光与原子、分子相互作用的认识带到一个全新的领域：这里涉及许多非微扰、相对论强非线性占了主导地位并且时间分辨达到亚阿秒的复杂动力学问题。由于传统的量子微扰理论完全失效甚至不能定性地解释实验，因此亟待发展能够处理超快超强物理问题的非微扰理论方法和模型。这方面的研究，由于其理论上的挑战性及在激光聚变、阿秒光物理、光控化学反应及高能天体物理等领域的广泛应用，受到越来越多的实验和理论物理学家的关注，成为国内外研究的前沿热点问题。

本人于 1994 年左右在陈式刚先生的引领下，进入这一奇妙的领域。十余年的探索更使我领略到这一领域的博大和自己的才疏学浅。本书的写作过程可以说是我们对前段工作的总结和整理。围绕我们自己多年的工作以及对相关问题的认识，在本书中我们将对强场物理的前沿课题作些讨论。这些讨论想必是挂一漏万，权作一种抛砖引玉的尝试。希望通过本书能吸引更多的学生从事强场物理的研究并对相关领域的科技工作者有所帮助。由于本人学识有限，对本领域发展迅猛的前沿可能有不妥的描述，不当之处欢迎各位批评指正。

特别感谢贺贤土先生对相关研究的长期关心、悉心指导和鼓励；感谢徐至展先生领导的攀登计划及 973 项目对本课题研究的长期支持；感谢张杰先生 20 世纪 90 年代回国后对强场物理研究的大力推动以及其领导的 973 项目对本课题研究的支持。感谢 Dr. J. H. Eberly, Dr. P. B. Corkum, Dr. W. Becker, Dr. X. M. Tong, Dr. J. M. Rost 等国际强场领域专家的交流及多次有益的讨论。

还要感谢与国内许多单位及专家（如刘运全、柳晓军、陈京、王兵兵、谢柏松、颜学庆等教授）有益的合作及帮助。

感谢我的学生程太旺、陈彦军、叶地发、李维、辛国国、张春艳、白如君、黄凯云、陶建飞等，他们在当今相对浮躁的环境下潜心科研的精神让我感动，相关科研工作也不同程度地反映在本书中。感谢程茸博士后，她对团簇部分的调研和整理使得相关叙述更加完善。

最后,感谢国家自然科学基金委员会、科技部 973、863 项目及《中国工程物理研究院科技丛书》的支持。

刘 杰

2013 年 10 月于北清路

目 录

前言

第 1 章 从光电效应到强场物理	1
1.1 光电效应实验及爱因斯坦的量子论解释	1
1.2 强激光非微扰实验现象 —— 强场物理的开端	2
1.2.1 多光子与阈上电离	2
1.2.2 电离抑制现象	5
1.2.3 高次谐波的平台	7
1.2.4 双电离与动量关联谱	8
1.3 非微扰理论概述	11
1.4 小结	13
参考文献	14
第 2 章 强激光场中的原子	18
2.1 从多光子电离到隧穿电离	18
2.1.1 Keldysh 理论	20
2.1.2 经典再散射的 simple-man 模型	21
2.1.3 隧穿电离的半经典模型	23
2.1.4 KFR 方法	24
2.1.5 量子再散射理论	25
2.2 双电离中的关联电子	26
2.2.1 奇异的 He 原子双电离率	26
2.2.2 非序列双电离的离子动量谱	27
2.2.3 电子的动量关联谱	28
2.3 用三维半经典模型对原子双电离的研究	28
2.3.1 双电离的三维半经典模型	29
2.3.2 原子阈上双电离的 finger 结构之谜	34
2.3.3 原子阈下双电离的反关联动量谱	42
2.3.4 圆极化光中的非序列双电离	51
2.4 原子非序列双电离的量子散射矩阵理论	57
2.4.1 在 NSDI 中散射矩阵理论的基本方程	57
2.4.2 鞍点近似的使用	58

2.4.3 散射矩阵方法获得的电子的动量关联谱	60
2.5 高次谐波产生	61
2.5.1 高次谐波产生的 Lewenstein 模型	62
2.5.2 高次谐波产生的量子图像	64
2.6 稳定化现象	69
2.6.1 局域化的 KH 态	69
2.6.2 经典稳定“岛屿”	72
2.6.3 线极化单色光场中氢原子的电离率	77
2.6.4 原子在双色激光场中的电离与高次谐波产生	86
2.6.5 椭圆偏振场中原子隧穿电离的存活窗口	96
参考文献	103
第 3 章 强激光场中的分子	112
3.1 关联电子的双电离	112
3.1.1 分子双电离的半经典模型	112
3.1.2 分子双电离中的关联电子的奇异动量谱	115
3.2 双原子分子非序列双电离过程中的双中心干涉效应	126
3.2.1 解析理论	126
3.2.2 非次序双电离过程中的两中心干涉效应	127
3.3 双原子分子高次谐波辐射过程中的电荷共振效应	130
3.3.1 核间距较大的分子的强场近似模型	131
3.3.2 谐波劈裂和电荷共振效应	139
3.4 大的核间距分子的高次谐波辐射: 双中心干涉效应	145
3.4.1 考虑库仑修正的强场近似模型	146
3.4.2 两中心干涉效应及其与激光强度的关系	147
3.5 利用高次谐波实现分子轨道成像	152
3.5.1 分子轨道成像的基本原理	152
3.5.2 分子谱振幅的特征	154
3.5.3 两中心干涉效应对分子谱振幅的影响	156
参考文献	159
第 4 章 强激光场中的团簇	167
4.1 实验进展与数值模拟方法	167
4.1.1 实验研究进展	168
4.1.2 相互作用机制的理论研究	169
4.1.3 数值模拟方法	170

4.2 团簇的离化	172
4.2.1 团簇的内电离过程	172
4.2.2 团簇的外电离过程	175
4.3 库仑爆炸	176
4.3.1 纯库仑爆炸模型	176
4.3.2 关于库仑爆炸模型的一次改进	177
4.3.3 关于库仑爆炸模型的再次改进	183
4.4 Table-top 核聚变与中子源	186
4.5 团簇中电子的再散射	191
4.5.1 强激光场下电子的再散射理论简介	191
4.5.2 氢原子团簇系统的再散射	192
参考文献	197
第 5 章 强场物理新进展	200
5.1 阿秒物理学	200
5.1.1 阿秒脉冲的产生	201
5.1.2 阿秒钟	202
5.1.3 阿秒成像	204
5.2 强激光场中性原子加速	205
5.2.1 实验及理论进展	206
5.2.2 蒙特卡罗 + 隧穿方法	206
5.2.3 中性原子分布和它们的加速度	208
5.2.4 加速轨道的亚周期动力学	212
5.2.5 最大速度	213
5.3 原子电离过程中光子动量分配	215
5.3.1 极化光场中的动量分配	215
5.3.2 库仑效应	217
5.3.3 亚周期动力学	219
5.4 相对论超强场中原子的单电离问题	220
5.4.1 利用电离率标定场强	220
5.4.2 隧穿效应对场强测量的修正	221
5.4.3 利用电子能量对激光场强和载波相位的标定	223
5.5 真空离化及正电子产生	226
参考文献	229

第 1 章 从光电效应到强场物理

本章从光电效应开始,介绍原子在光场作用中电离问题的研究历程。主要介绍和评述相关的重要历史性的实验进展及非微扰的理论方法的发展。

1.1 光电效应实验及爱因斯坦的量子论解释

对于光场中物质电离现象的研究最早可以追溯到光电效应现象的发现。即在光的照射下,某些物质内部的电子会被光子激发出来而形成电流,即光生电现象。光电效应的初步迹象由德国物理学家赫兹于 1887 年首次发现,他在实验中发现两个锌质小球之一用紫外线照射,则在两个小球之间能非常容易产生放电现象^[1]。随后霍尔瓦克斯、林纳等科学家进一步的实验发现:只有当光子的能量大于某一临界值时才能发射电子,而与光的强度无关;与光照射物质的时间长短也无关,且发射电子具有瞬时性(见第 5 章),光强与光照时间只影响出射电子的数量,而不影响其能量。这些发现显然与经典的电磁理论有很多矛盾的地方:① 在光电效应中,要电离光电子需要有足够的能量。根据经典电磁理论,光是电磁波,电磁波的能量决定于它的强度,即只与电磁波的振幅有关,而与电磁波的频率无关;而实验观察到,能否发生光电效应只与光的频率有关,而与强度无关。② 根据经典理论,对很弱的光要想使电子获得足够的能量逸出,必须有一个可测的能量积累的过程,而实际上产生光电子的时间短得难以测量。这些矛盾预示着这一现象无法用经典理论解释。

1900 年,普朗克对另一个悬而未决的问题——黑体辐射作出了初步解释。他认为光是以不连续^[2],即量子化(quantised)的方式从光源发出的。他将该理论总结为一个等式: $E = h\nu$, E 就是对应的量子化能量, h 是普朗克常量,而 ν 是光源的频率。但当时普朗克只是将量子化局限在辐射过程。1905 年爱因斯坦推广了普朗克的理论,提出光子假设,成功地解释了光电效应^[3]。他认为射向金属表面的光,实质上就是具有能量为 $E = h\nu$ 的光子流。如果照射光的频率过低,即光子流中每个光子能量较小,当它照射到金属表面时,电子即使吸收了这一光子,它所增加的能量仍然小于电子脱离金属表面所需要的逸出功,电子就不能脱离金属表面,因而不能产生光电效应。反之,如果照射光的频率足够高,使电子吸收其能量后足以克服逸出功而脱离金属表面,就会产生光电效应。此时逸出电子的动能 E_k 、光子能量 $h\nu$ 和逸出功 I_p 之间的关系可以表示为 $E_k = h\nu - I_p$, 其中 I_p 也就是将电子从金属表面上电离所需的最小能量,也称为电离能。这就是光电效应方程。这个公式提出 10 年后,由美国物理学家密立根 1916 年发表的实验结果证实。

可以看出要发生光电效应,最基本的条件是一个光量子的能量大于需要电离的电子的电离能,即 $h\nu > I_p$ 。在激光器发明之前,由于光强比较低,这种描述总是正确的。但是在激光发明之后,随着场强的增强,在单位体积中的光子数也越来越多,原子中的电子有可能同时吸收多个光子,从而在单个光子能量不足以将其电离的情况下 ($h\nu < I_p$) 发生电离。随着激光场强进一步增强,当场强接近于能够将电子直接电离出去时,电场对于电子的作用相对于库仑势来说已经不能再看成微扰,各种非微扰现象也随之出现,在 1.2 节中将集中讨论这些现象。

1.2 强激光非微扰实验现象 —— 强场物理的开端

从 1960 年世界上第一台激光器发明开始,激光强度就在不断提高。尤其是在过去 20 多年时间里,自从啁啾脉冲放大 (chirped pulse amplification, CPA) 技术发明以来,场强提高了 8 个数量级。如图 1-1 所示,目前超过 10^{22} W/cm^2 的强场已经实现,正在向更高的非线性量子电动力学区迈进。而能够将电子从原子中直接电离出去的场强在 $10^{16} \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$,如果用接近于这个场强的激光与原子作用,微扰理论不再适用,一些非微扰现象将会出现。

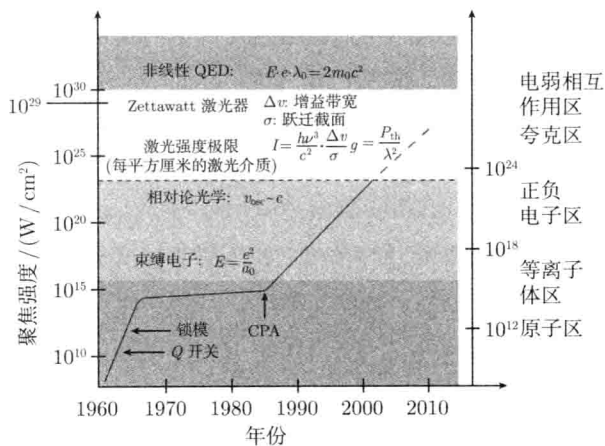


图 1-1 强场发展历史^[4]

1.2.1 多光子与阈上电离

在强场中,由于光子的密度特别大,原子处在周围充满光子的海洋中。在这种情况下,即使每个光子能量都比其中电子的电离能低,该电子仍然有可能同时吸收多个光子的能量而电离出去,这种电离现象称为多光子电离。该现象早在 1931 年就被 Göppert-Mayer 在理论上预言了^[6],直到激光器发明后才在实验上得到了验证^[7, 8]。

在多光子电离的图像中,一般认为只要吸收克服电离能所需的最小光子数,电子就

能逃脱从而电离。这是爱因斯坦光电效应对多光子电离的简单推广。在这个图像里，电子的动能 T 遵守爱因斯坦的光电方程

$$T = N\hbar\omega - E_I \quad (1-1)$$

其中， E_I 是原子的电离能， N 是电子电离所需的频率为 ω 的光子数。然而在 1979 年，Agostini 及其合作者发现了 Xe 原子电离的光电子能谱出现了对应于 6 个和 7 个光子能量的两个峰^[9](类似于图 1-2(a))，后来 Gontier 等将这种吸收超过最小光子数的电离命名为阈上电离 (above threshold ionization, ATI)^[10]。此后该现象便得到了科学家的重视。

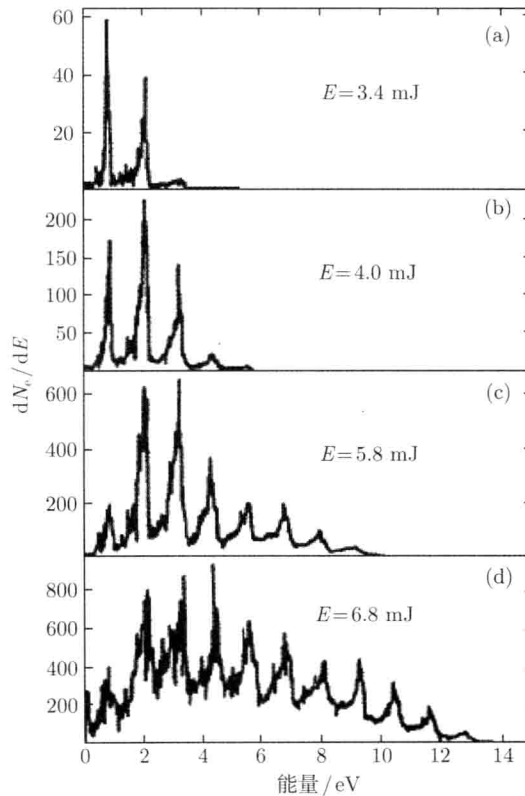


图 1-2 阈上电离电子的能谱^[10]

随着激光场强增大，高阶分立峰的位置发生了移动，非微扰现象增强

对阈上电离现象的困惑首先来源于，为什么离化电子能够吸收额外的光子？在相对论框架下可以得到，一个自由电子是不可能吸收光子的。Eberly 等的综述文章^[11] 对此有简明的推导，这里重复如下：

考虑一个自由电子吸收 N 个光子的过程。记 $\mathbf{P}_0 = (E_0/c, \mathbf{P}_0)$ 和 $\mathbf{P}_F = (E_F/c, \mathbf{P}_F)$ 为自由电子的初态和末态四维动量，而对应光子的四维动量为 $\mathbf{k} = (\hbar\omega/c, \hbar\mathbf{k})$ 。如果多光