

# 原子分子物理学研究的意义与发展趋势\*

雷体仁

洪明苑

(中国科学院武汉物理所)

(国家自然科学基金委员会数理学部)

**【摘要】** 本文综述原子分子物理学研究的重要意义和当前发展趋势,简要描述国内研究状况及今后发展的设想。

## 一、发展原子分子物理学的重要意义

原子分子物理学是研究原子分子的结构、性质、相互作用和运动规律,阐明物理学基本定律,提供各种各样的原子分子信息和数据。

原子分子物理学的起源可以追溯到19世纪对太阳光谱和气体放电的研究,但经历了本世纪20年代第一次发展高峰时期以后,才成为一门独立的物理学分支科学。那时人们开始闯进原子分子的微观世界,在大量实验研究的启示下,人们终于建立起量子力学。这是物理学上划时代的突破,它为许多现代科技领域的发展铺平了道路。原子分子物理学已成为揭开微观世界奥秘的先驱,现代科学技术的奠基石。

在四五十年代,射频波段波谱学的发展,使原子分子的测量精度提高了百万倍以上,为创立和检验量子电动力学、相对论和各种基本对称性提供实验基础,开辟了精密测量和量子计量的新时代。从70年代到现在,原子分子物理学又进入了一个高峰时期,其特点是研究领域空前广泛,数据空前精确,发展空前迅速。这不仅是本学科自身发展的深入和延伸,也不仅是由于计算机、激光、束技术和检测技术的发展提供了必要条件,更重要的是当今全世界范围内发展新高技术的剧烈竞争,迫切需要大量的原子分子物理方法和数据,从而极大地推动了原子分子物理学的发展。

原子分子物理学在推动科技进步和社会发展中具有重大作用。诺贝尔物理奖从1901年至1989年共颁奖83次,其中,从1902年的Zeeman至1989年的Ramsey, Paul和Dehmelt,计有16次是授予原子分子物理方面的研究工作,这是原子分子物理学巨大贡献得到公认的最好证明。发展原子分子物理学的重要意义可以概括为如下几个方面:

**1. 建立和检验基本物理定律** 氫原子光谱研究是量子力学的奠基石之一,如兰姆位移和电子异常磁矩测量是电动力学最早和最精确的检验;精确对比分别置于火箭和地面上的两台原子频标所测得的重力红移,证实了广义相对论;测量单原子级联荧光偏振关联证明了Bell不等式,回答了量子力学是完全的理论表述这一长期争论的问题。又如,测量正、反粒子相应物理量之比检验CPT定理;测量某些重原子的禁戒跃迁,证实原子跃迁过程同样存在宇称不

\* 本文根据国家自然科学基金委员会组织的原子分子物理学科发展战略研究组的研究报告改写而成。

守恒,再一次证明弱电统一理论的正确性;以及测量中子偶极矩检验时间反演不变性等等。

**2. 开拓高新技术产业** 对气体放电和电子束的研究,促进了电子学的诞生和现代电子工业的发展,无线电通讯和自动控制使社会生产和人们生活发生了革命性的变化;对磁共振和激光器的研究,促进了量子电子学的诞生,并带来了精密测量和量子计量的新时代;激光器向光频延伸产生了激光,促进了光电子学诞生,目前激光产业正在迅猛发展。

**3. 促进邻近学科的发展和边缘学科的形成** 原子分子物理与光物理的关系历来十分密切,原子分子与辐射的相互作用是它们共同的研究对象,人们最近将它们统称为原子分子和光物理(AMO)。原子分子物理为核物理提供高精度的核参数,核及其原子环境间的动力学相互作用是当前这两个学科共同的研究前沿。分子结构和动力学研究为化学和生物学提供坚实的物理基础和有效的实验手段,出现了量子化学、分子反应动力学、分子生物学等边缘学科。原子分子团簇是当前原子分子物理、凝聚态物理和物理化学共同的研究前沿,它的发展将不断开创在原子分子水平上设计和发展新材料的新局面。

**4. 国防科技和生态环境** 原子分子物理在国防建设方面有着十分重要作用。原子钟是现代导航、通讯、全球定位和发射同步系统的核心。高功率激光器应用于新型对抗系统和定向能量武器,而发展和使用这些系统都离不开原子分子物理基础。在航天领域,运动物体的加热、辐射及跟踪、探测与识别等都与原子分子的激发、电离、离解、反应、辐射等研究分不开。在减少污染、改善人类环境方面,原子分子物理也是重要的基础,人们普遍担心臭氧层破坏、大气污染、电离辐射对生物的杀伤等都需要原子分子理论和数据。

**5. 能源和医学** 在能源方面,不论是激光核聚变、磁约束核聚变的探索,还是提高燃烧效率的研究,都离不开原子分子物理理论和数据。磁共振成像应用于生物学和医学,对保证人们健康作出越来越大的贡献。

**6. 培养优秀科技人才** 原子分子物理学是许多涉及原子分子层次的学科的基础,这些学科都需要有原子分子物理知识的专门人才。相对地说,原子分子物理研究的设备条件大多属于小型和分散的,学生有更多的机会参加前沿研究独立完成研究课题。除了学习到本专业知识外,还能得到机械、真空、电子学、激光、计算机等多方面的训练。因此,原子分子物理研究将培养具有多方面技能、独立工作能力和适应性较强、可以在许多学科领域工作的优秀科技人才。

## 二、当前原子分子物理学的发展趋势

当前原子分子物理学正处在新的发展高峰时期,在原子分子结构、碰撞动力学、与辐射相互作用和检验物理学各种基本定律等方面不断取得令人瞩目的重大进展。

原子物理学在研究自然界的基本定律方面仍然是当前十分活跃的重大课题。基础原子物理是通过原子来研究空间和时间的基本性质,检验自然界的基本相互作用和对称性,发展新的精密测量技术。当前的主要研究热点有:中性原子囚禁,利用囚禁技术测量电子磁矩精度达 $10^{-12}$ 量级,今后精度还可以提高百倍;研究粒子与反粒子的对称性以检验CPT定理;获得更精确的电子与质子的质量比;高精度地比较核质量提供测量中微子质量的新方法;囚禁冷却的粒子研究如玻色凝聚等新物态。利用波谱学中的隔离场方法更精确地测量中子磁矩检验时间反演对称性;继续研究原子中的弱电相互作用检验弱电统一理论;研究高离化态和奇异原子,

进一步检验量子电动力学和相对论性多体效应等等。

除了上述基本检验外,当前原子物理研究还有多电子原子研究和原子瞬态研究两个方面。前者包括阐明多电子原子中电子运动的关联,获得多体系统的物理理解和定量描述,并用这些概念去解释分子或其他更复杂系统中的原子动力学行为。后者包括中间态和非稳定态物理性质的描述,原子碰撞中的能量、角动量和粒子的交换,深入理解高度关联的中间态的作用。主要的研究热点有:原子高里德伯态(主量子数已达 500)、高角动量态和圆态,这些都是崭新的原子样品;行星原子为研究电子关联和多体量子体系动力学提供有效的方法;里德伯原子在强电磁场中的行为提供了研究动力学对称的机会;里德伯原子碰撞提供研究散射通常不可能达到的低能电子散射的机会。内壳层电子激发为研究关联效应、检验相对论和量子电动力学提供机会。自电离、负离子、双电子复合和缔合电离等提供电子连续态结构的机会。碰撞过程中的近似守恒律、态-态完全碰撞和超慢碰撞等研究有重要意义。对高离化态的研究,现在已经能产生类氢的铀离子,为核聚变和短波光研究提供方法和数据;等电子系列为了解核电荷对相对论和量子电动力学效应的影响提供唯一的机会;此外,瞬时超重原子、电子-正电子成对的产生,激发态原子的形状等研究也属前沿。多光子过程为研究关联电子动力学开辟新的途径。离子和原子的冷却和囚禁成功地开辟了精密测量和基本检验的新局面。激光场中的碰撞可产生新的跃迁,提供控制化学反应产物的途径。强激光与原子相互作用可导致离子实和外层电子的耦合激发,提供研究离子实的集体运动与外电子、强光场的耦合和相互作用的机会,而且可以产生高离化态和高次谐波。

分子物理的复兴表现在许多方面,归纳起来主要是两类问题:一类是简单分子的光谱和结构,人们希望了解随着原子数的增加分子的电子特性是如何变化的,靠弱的范德瓦耳键结合在一起的分子其几何构型是由什么因素决定的,分子里德伯态的结构如何反映分子离子实内的相互作用等等;另一类问题是分子中的电子和核在彼此的场中的动力学行为。传统的分子结构概念受到挑战,现在认为结构与动力学是不可分割的,它们有内在的统一性。下面列举几个研究热点:自由基和亚稳分子等短寿命高活性样品的研究,加深了对化学反应动力学的理解,提供控制化学反应过程的新方法。原子分子团簇研究揭示从单个原子到凝聚态的演变规律,为催化和材料设计提供依据。研究小分子体系从低激发态的很有规律的内部运动到高激发态出现能量的随机分布(浑沌)的转变,是选态化学的重大进展。还有,利用单色激光研究分子激发、电离和态态反应动力学过程;利用短脉冲激光研究分子内能转移;利用紫外及软 X 射线研究激发分子中的动力学过程;激光裂解(半碰撞)研究碰撞动力学和自由基演变等都是重要的热点。

上述情况充分说明当前原子分子物理研究领域广泛、数据精确、发展迅速。这些问题不仅有重大的科学价值,而且有很强的高新技术应用背景,因此,美、苏、西欧等先进国家对此十分重视。

### 三、我国原子分子物理研究现状

我国原子分子物理研究有较长的历史,老一辈原子分子物理学家曾作出过重大贡献,近十年来又有明显的发展。据 1988 年调查,目前,包括国家重点实验室和部门开放实验室在内共有 50 多个单位、高级研究技术人员 200 余人从事原子分子物理研究,在研课题 100 多个。

1986—1989年基金委员会资助的面上项目共37项,总经费121.8万元,重大项目两项,总经费250万元。1986—1989年《中国物理文摘》报道的原子分子物理研究论文共581篇,占物理学论文总数的3.1%。研究设备以计算机和激光光谱实验装置为主,还有离子阱、交叉束装置以及低能加速器等。同步辐射和重离子加速器的建成为原子分子物理研究提供了有效的新手段。从研究内容看,电子与原子分子散射理论和磁共振研究等有较长的历史,原子频标研究曾为国民经济和国防建设作出过贡献。目前原子分子激发态研究较多,多通道量子亏损理论研究曾在国际上获奖。高离化态、内壳层电子激发态、原子分子在强电磁场或强激光场中的行为、离子与原子分子碰撞、原子分子与固体表面碰撞、核磁共振成像、原子分子团簇、聚变等离子体以及航天工程和星际的原子分子问题等研究都已开展,建立原子分子数据库的工作已经起步。1988年12月第四届全国原子分子物理学术会议35岁以下的年轻人占代表总数的40%,说明年轻科技人员正在成长。

我国原子分子物理研究与国际上和国内其他物理学分支学科比较仍然是薄弱的领域,远远不能适应我国科技发展和国民经济、国防建设发展的需要。由于缺乏统一的规划和有效的调控措施,目前还存在零星、分散、重复和布局不合理的状况。交叉学科和为高技术服务的原子分子物理基础研究未得到应有的重视,实验研究尤为薄弱。经费不足是很明显的,我国自然科学基金委员会每年投入原子分子物理面上项目的经费只有美国国家科学基金会的1/150,法国国家科研中心的1/76。我国每项课题平均经费3.29万元,只有美国的1/10。我国原子分子面上项目只占物理学面上项目经费的5.65%,而美国是9.31%,法国是10.1%。我国基础研究经费主要靠国家自然科学基金委员会,而美国除了基金会外,还有一半来自国防部、能源部等单位。科技力量不足也是明显的,我国只有200多人,美国有3000人;我国每年只培养5名博士生,美国(包括光物理)有140人。假如考虑到我国科技人员精力不能集中效率不高等因素,这个差距就更大。

#### 四、发展我国原子分子物理学研究的建议

原子分子物理学科发展战略研究组提出中近期的方向和目标:选择有限目标,争取在原子分子高激发态、高离化态、碰撞动力学、原子分子团簇等国际前沿领域做出有特色和创造性的研究工作。同时,瞄准我国国民经济和国防建设的高技术计划,有选择地结合国内急需的X光激光、核聚变、高速飞行器等开展原子分子理论和实验研究,提供原子分子数据和计算方法。通过上述研究工作的开展,为今后我国原子分子物理研究更大发展打下坚实的基础。

建议国家科委组织全国原子分子物理专家组,专门制定“八五”期间全国原子分子物理发展规划,各有关部门在全国统一规划指导下发挥各自优势,协同配合,调整不合理的布局,力求使有限的人、财、物发挥最大的作用。为了我国高技术的发展,近期采取切实步骤,建立我国原子分子数据库是十分迫切必要的。

建议国家自然科学基金委员会,在“八五”期间再选择二三个学术思想新颖、对原子分子基础实验有较大推动作用的项目给予更多支持,并争取与国家重点实验室及部门开放实验室密切配合。对面上项目,根据原子分子物理学科发展战略研究报告中所提出的前沿和定向课题进行导向,择优支持。注意侧重支持原子分子物理新现象的探索和基本规律的验证,对原子分子物理与其他学科交叉的课题予以更多关注。加强与物理学会原子分子专业委员会的联系,

随时注意学科发展新动向,及时发现优秀课题和优秀人才,以使这方面的研究取得更快的发展。

## SCIENTIFIC SIGNIFICANCE AND PRESENT DEVELOPMENT TENDANCY OF ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS

Lei Tiren

Hong Mingyuan

(Wuhan Institute of Physics Chinese Academy of Sciences) (Dept. Mathematical and Physical Sciences, NSFC)

### Abstract

This article discourses to the scientific significance and present development tendency on atomic and molecular physics, and it describes briefly the research state and development tentative idea in the future on atomic and molecular physics in the China.

### 英文期刊《热科学》创刊

由中国科学院工程热物理研究所陈乃兴教授主编的国际性英文季刊《热科学》(《Journal of Thermal Science》)于今年一季度出版。该期刊的编委会和顾问编委会由 11 个国家 36 名知名专家教授所组成。《热科学》杂志由科学出版社出版。

《热科学》为热力与流体科学领域的科研与应用提供了一个国际讲坛,发表该领域内容分支学科的实验、数值计算和理论研究方面的文章。期刊覆盖了工程热力学、流体力学、传热与传质、燃烧、多相流动、多孔介质中的流动与热力过程、内流气动热力学、热物性、测量与可视化技术等分支学科。

《热科学》也发表应用上述方面的基础知识在工业过程和设备设计中的论文,如:设备中的传热与传质、能量守恒与转换、叶轮机械、燃气轮机与内燃机、窑炉与锅炉、电气与电子设备的冷却、制冷设备、热管技术、加工技术与材料制备与处理过程等。

《热科学》创刊的目的是为了促进国内外同行们在热力与流体科学的信息交流,反映中国和国际上在这方面的重大研究成果。

《热科学》杂志欢迎国内外有关上述方面未发表过的论文。来稿请寄 北京 中国科学院工程热物理研究所《热科学》杂志编辑部。邮编 100080。