

当代的光物理学与原子分子物理学

叶佩弦

一、前 言

光物理和原子分子物理是两个既有区别又有密切联系联系的学科。

原子分子是物质组成的一个基本层次。原子分子物理学是研究这一层次的结构、运动状态及与周围环境和外界条件相互作用的科学。光学是研究光的基本性质,光的产生、传输、接收、显示及其与物质相互作用的科学。随着光学的发展和应用领域的日益扩大,比较偏重应用和技术的部分已逐渐脱离物理学而成为独立的科学技术门类。但是,光学作为物质存在的一种形式和物质运动的一种基本形态的研究,光与物质相互作用的诸多领域的研究,仍然是物理学的重要分支,构成“光物理学”的主要内容。目前,就研究的对象和方法而言,光物理与原子分子物理往往是交叉渗透难以明确区分的。

光物理和原子分子物理曾经是人类认识世界的先驱,对近代科学理论的建立起过巨大的作用。人们不会忘记,“量子化”的概念首先是在光这种物质存在的特殊形态里提出来的。同时,正是对氢原子光谱的归纳分析和对氢原子的结构和运动规律的研究导致旧量子论的提出和其后发展为近代量子理论。众所周知,量子理论当今已经不仅仅只是讨论微观运动的基本理论,而且也是近代科学技术得以发展的最重要基础之一。

光物理学和原子分子物理学对近代科技的最深刻最巨大的推动,无疑是六十年代初激光的发现及由之而来的技术进步。正是人类对电磁辐射与原子分子相互作用三种基本过程(吸收,自发辐射和受激辐射)的深刻认识以及有关原子分子能级和光谱的大量数据积累,加上后来微波、光学和电子学技术的发展,导致了激光的发现和发现。激光这种相干光的出现又为光物理和原子分子物理注入了新的活力和新的研究内容,使他们的面貌为之一新。

光物理学和原子分子物理学仍然蕴藏着巨大的应用前景。这在本文的后一部分将会进行论述。正是这些应用前景、成为当代光物理与原子分子物理研究的重要原动力之一。

二、当今活跃的前沿领域

就光物理学而言,活跃的前沿主要是在激光光谱

学、非线性光学与量子光学以及激光化学的基础问题等领域中。

1. 激光光谱学。激光光谱具有常规光谱无法比拟的优点。首先是具有很高的光谱分辨本领。1970年已达 10^6 ,以后又提高了5~6个数量级。目前禁錮原子法估计可高达 10^{11} 。其次表现在具有高的时间分辨率。如果时间分辨率用激光脉冲宽度所能压缩的程度来衡量,目前已达十几个皮秒(ps,毫微微秒)。再有是表现在高的光源单色亮度,因而可发展一系列奠基在非线性光学基础上的新的光谱探测方法。具体领域有:

(1) 高分辨与超高分辨光谱学。方向是发展和探讨各种消多普勒加宽的光谱法;发展克服渡越时间加宽的技术以及克服二级多普勒加宽的禁錮原子光谱术。使光谱分辨率达到以致超过自然线宽给出的极限。

(2) 超短脉冲的获得与超快过程光谱学。目标是:发展多种压缩激光脉冲宽的方法,以获得皮秒级的超短激光脉冲;将超短脉冲技术与激光调谐技术相结合发展超快过程光谱学,进行物质中或化学反应过程中各种超快过程的研究。

(3) 相干瞬态光学效应与相干瞬态光谱学。包括扩展各类光子回波的研究,并与瞬态光混频结合起来;发展非相干光子回波等新概念以扩展其应用;发展光学“孤子”的理论与实验。

(4) 非线性光学的光谱学。主要方向是继续发展各类型的相干喇曼光谱;扩展多频共振回波混频光谱和碰撞感生光谱的研究;发展瞬态栅的泵浦——探测技术等。

(5) 相干光波段的扩充及量子频标的研究。例如相干紫外、真空紫外与X射线激光产生的各种物理机制的探讨;量子频标精度的提高等。

2. 非线性光学与量子光学。这是一个激光出现后蓬勃发展至今仍十分活跃而有着重要应用背景的领域。具体方面有:

(1) 光学双稳、非稳与混沌的研究。光学双稳在光计算、光通讯和集成光学等光电子技术领域有重要应用。目前一方面在一些新材料(如半导体及超晶格材料)中进一步积累有关资料数据;另一方面发展诸如光学限幅器、光学微分放大器、光开关、光学逻辑和存储元件等。关于非稳和混沌的研究,目前除继续在光

学双稳装置上探讨这些过程的规律外,主要是发展在激光器中以及在其它非线性光学效应中这些过程的研究。

(2) 光混频与位相共轭光学的研究。主要方向是探讨新材料(如光折变材料)中光混频与光学位相共轭的特殊机制、现象和规律,探讨光混频中的新效应,例如二波相互作用中光的放大与衰减等。

(3) 光的压缩态(Squeezed State)的产生和应用。光的压缩态是新近提出的一种概念,是光场中区别于光的相干态的一种特殊量子态。在这量子态中一对共轭量(例如振幅与位相)中的一个,其量子起伏可压缩至无限小。目前国际上已有几个实验室相继获得了这种态。这种态在极低噪音的光通讯中可能有重要的应用前景。

(4) 表面与界面的非线性光学。主要方向是探讨利用非线性光学效应(例如光学二次谐波)进行表面吸附、表面相变等表面物理与化学性质研究的途径。

(5) 开放系统量子光学效应的研究。例如有关超荧光、超辐射及光场相干性统计性的研究等。

3. 激光化学中一些基础性问题

激光化学是最有应用前景的研究领域之一。但它的走向应用仍需进行许多光物理方面的基础性研究。目前活跃的研究内容包括:

(1) 交叉分子束激光技术与物理,以及化学反应动力学的研究。

(2) 激光催化和催化活化物理的研究。

(3) 激光沉积、激光重结晶、激光退火、激光改性等的机理研究。

就原子分子物理学而言,活跃的前沿有三个,即结构、碰撞过程和环境效应。每个前沿又都有数个生长点。

1. 结构研究。这本是原子分子物理的传统课题。但由于能谱测量方法的发展和分辨率的大大提高,以及计算方法和技术的改进,结构问题的研究也愈加深入。当前存在四个生长点:

(1) 激发态结构。对于原子,当前主要方向是利用当代发展起来的各种高分辨能谱技术将极为丰富的激发态能谱揭露出来,获得主量子数更高的里德堡原子;建立处理束缚态和连续态的统一理论。对于分子激发态结构,除电子激发外,还有振动转动激发和解离,因此将更为复杂,未开拓的领域也更多。

(2) 原子集团结构。主要方向是开展包括不稳定分子和自由基在内的非稳定原子集团结构的研究。

(3) 超精细结构。主要方向是用微波波谱和各种高分辨能谱技术发现和精确测定由同位素效应以及高电场动力学效应产生的能级的超精细分裂。

(4) “奇异”结构。指“原子”或“分子”的结构涉及 μ, π 或反质子等粒子时,该“原子”或“分子”的结构。

反氢原子(positronium)就属于这样的“奇异”原子。

2. 碰撞过程。即研究处在各种状态的原子分子与不同能量的光子、电子、原子或分子的碰撞过程及其结果。可以是二体、三体以至多体碰撞。当前方向是,从理论上建立和发展计算这类多体量子力学问题的方法;实验上建立和发展各种交叉束碰撞技术,以精确测定各种碰撞截面。当前的两个生长点是:

(1) “完全”碰撞实验。指碰撞前入射粒子与靶粒子的量子态,碰撞后其产物的量子态均能精确选定或监测。

(2) 量子碰撞理论。

3. 环境效应。即研究外界环境对原子分子的物理和化学性质的影响。存在两个生长点:

(1) 强场效应。即在极强静电、静磁或交变电磁场下原子分子的特殊行为。尤其是在高激发态。

(2) 稠密效应。即研究密度很高时所引起的原子分子物理性质的变化。

三、巨大的应用前景

光物理学和原子分子物理学的研究对于发展激光技术、通讯技术、计算技术、能源和材料科学都有重要意义,与化学和生物学的研究也有着密切的联系。由于篇幅限制今仅列举以下诸方面:

1. 推动激光技术的进一步发展。包括新型激光器的出现,激光功率和能量的进一步提高,新的激光调谐技术的发展,激光波段的扩展和X射线激光的产生等。

2. 推动光电子学的发展和光电子工业的建立。这里包括光通讯、光计算和集成光学等技术的实现和发展。

3. 激光分离同位素的实现将大大推动核能的利用。

4. 原子分子物理的研究和原子数据的积累将对未来能源——受控热核聚变的实现有重大影响。

5. 原子分子物理的研究,尤其是碰撞过程的研究,将对磁流体发电机这种高效率发电设备的研制和发展作出重要贡献。

6. 在激光光谱研究的基础上发展起来的单原子和少数原子探测技术,将为激光测污和痕量杂质的探测提供新的技术途径。这对环境科学的发展和高纯材料的制备和检测有着重要意义。

7. 在光物理研究基础上的光信息传递的改善以及模糊图像的复原与识别,对于军事目标的识别、武器的制导、环境保护和自然资源的探测和利用均有重要作用。

8. 光物理学的研究是激光引发化学反应,激光定向化学反应,激光化学合成以及对化学反应进行监测的基础。激光化学的走向工业,将会带来巨大的经济

(下转第28页)

场离子显微镜

——陆华——

一、历史的回顾

场离子显微镜 Field Ion Microscope (FIM) 是一种具有高放大倍数、高分辨率并能在原子级水准上直接观察表面原子的研究装置。它是由比它出现早 15 年的场发射显微镜 Field Electron Emission Microscope (FEM) 的发明者 E. W. Müller 本人改进而成的。在 FEM 中, 当一负电位加到针状样品并产生 $\sim 10^7$ V/m 的场强时, 在样品尖端会因隧道效应而出现冷电子发射, 从而将其表面状况扩大投影到离样品 10cm 左右的荧光屏上成像。然而, 这种发射电子具有较大的横向速度分量 and 较长的 de Broglie 波长, 因而限制了 FEM 像的最大分辨率, 只能在 20 Å 左右。为提高像的分辨率, Müller 进行了长期的实验探索, 最后

提出了改用离子成像, 并用降低样品温度以减小成像离子的横向速度分量的办法实现原子级分辨率的设想。直到 1941 年发现场脱附现象之后此设想才逐步得以实现。1951 年, Müller 将它作为“成像气体”充到抽空了的 FEM 镜体中, 并在针状的 W 样品上加了正的高电压, 使成像气体原子在样品表面附近产生“场离子”, 终于得到了 W 的原子像, 这就是最初的 FIM。到了 60 年代, 由于超高真空技术、低温技术、微电子学以及各种表面分析技术的迅速发展, 使 FIM 产生了新的飞跃。 10^{-11} Torr 真空的获得, 使单个表面吸附原子的扩散、成簇、重排以及脱附等动态过程的观察成为可能。电子倍增微通道板的问世, 解决了离子像的亮度及显微观察中动态摄影上的困难。高灵敏质谱技术的引入, 使原子的质量分辨提高到 $1/1000$ a.m.u. 脉冲激光新技术的应用, 解决了在低温下导电率较低的半导体或绝缘体样品的分析问题, 从而使金属/半导体界面等研究取得了突破性的进展。尤其是从 1967 年 Müller 将 FIM 与飞行时间质谱结合在一起, 建成世界上第一台原子探针场离子显微镜 Atomprobe Field Ion Microscope (APFIM) 以来, FIM 的研究进入了定量化阶段。因而它作为一种具有极限原子分辨能力似

据报道, 一九八六年七月, 美国科学家在这座托卡马克聚变反应堆的试验中分别取得了两项突破: 即产生了 2 亿摄氏度的高温和实现了对等离子体创纪录的长时间约束。另有报道说, 欧洲共同体委员会于同年十一月宣布, 欧洲共同体的受控核聚变试验装置成功地将等离子体温度提高到 1 亿 4 千万摄氏度, 使等离子体密度达到每立方厘米 2 亿 5 千万亿个, 并且将等离子体约束时间保持 0.5 秒。报道认为, 这一突破超过了美国和日本科学家在这一领域已取得的成就。

上述这两项突破, 使人类利用核聚变能的研究又向前迈进了一步。

2 亿摄氏度是目前在世界上所记录到的最高温度。这一温度是太阳中心温度的 10 倍。科学家指出, 这一创纪录高温使人类第一次达到了实用性核聚变反应堆所要求的温度。普林斯顿等离子体物理实验所所长哈罗德·弗思说, 美国科学家期望在一年内达到另一个目标: 在同一试验中产生高温和实现等离子体长时间的约束。他宣布, 实验所下一步的目标是达到盈亏平衡, 即反应堆产生的能量至少等于使反应堆启动和运转所需的能量。美国核聚变能工程部主任约翰·克拉夫指出: “我们现在已有实际可能在托卡马克装置的基础上建造稳态的聚变反应堆。”

普林斯顿等离子体物理实验所副所长保罗·托瑟福德博士在几年以前, 当 TFTR 反应堆记录到 7000 万摄氏度时就曾指出, 尽管目前受控热核聚变的研究仍然处于婴儿期, 然而这个时期即将结束。他估计到 2020 年受控核聚变反应堆将对人类的电能需求作出有意义的贡献。现在, 当 TFTR 产生 2 亿摄氏度高温时, 美国核聚变能工程部主任克拉克以乐观的口吻表示, 他预料在十五年内就有可能建造出实用的聚变反应堆。如果这个目标如期实现, 那对人类来说该是多么巨大的喜讯啊!

受控热核聚变最吸引人之处在于, 热核反应堆与目前的裂变反应堆不同, 它没有放射性副产品, 在能量生产过程中只留下少量的放射性废料, 而且不存在反应失控和反应堆熔化的可能性。

受控热核聚变反应堆投入工业使用, 将在二十一世纪给人类带来无限的光明与巨大的希望。当人类终将点燃自己的太阳的时候, 这不仅标志着人类已打开了永不枯竭的能源的闸门, 而且也标志着人类向更高级的文明跨出了一大步!

(上接第 10 页)

实验。

9. 光物理的研究也将大大推动分子生物学的发展。通过生物分子的光谱和时间分辨谱可以研究生物分子的结构和生物分子演化的动力学过程, 从而将为发展分子生物学及其应用作出贡献。