

原子、分子物理学及光学发展展望

ATOMIC, MOLECULAR AND OPTICAL PHYSICS

余永柏

原子、分子物理学及光学物理(以下简称AMO物理学)主要是阐明物理学的基本规律;在原子及分子的层次上了解物质的组成及演变发展;了解光与物质的相互作用;创造出新的技术及设备。

AMO物理学是把物理学与其他学科(如天文、气象、生物物理等等)联系在一起的总科学桥梁中一个组成部分。AMO物理学在研究中所建立起来的实验方法及理论方法,经常被核物理、等离子体物理、大气物理、凝聚态物理、表面物理、高能物理等所采用,同时也为其他科学领域所采用。AMO物理学所建立起来的各种数据(包括精确测定的自然界各种基本常数),是整个自然科学所依赖的知识基础之一。

AMO物理学研究也延伸到应用科学的广阔领域之中,如在国家安全、能源规划方面,它都曾做出过贡献。AMO物理学研究中所创造出的高技术均导致了新工业的兴起。

AMO物理学在培育科学人才方面(大学及研究生水平)也起着重要作用。这些科学家中很大一部分人将有助于推进国家的能源、军事以及环境等规划。

AMO物理学又是个非常多样化的研究领域,而这也正是其知识活力来源的重要源泉。AMO物理学的各个分支都与邻近的科学领域相互影响着。例如:有关电子与正电子的量子电子学实验激发了制作原子钟及光学频标的新技术;在高原子碰撞中所引起的内壳层过程与基本的化学反应有着紧密的联系;在实验室中所进行的那些低能离子实验研究促使人们重新认识天体物理中的

那些基本过程等等。科学的统一性贯穿着整个的AMO物理学领域。

很多杰出的年青物理学家目前在化学部门工作,这正显示出AMO物理学方法在解释各种自然现象方面的能力。化学家们虽能从原子碰撞理论或实验中发现化学反应的新观点,然而其至关重要的核心——在自然界探索统一性与普遍性,则是物理学家的任务。化学家与生物学家需要AMO物理学家的洞察力去阐明物质及有机体在性质上的多样性。这意味着AMO物理学是不可缺少的,它的成就广为其他科学及工程学所吸取。

1986年,美国的AMO物理学专家小组为美国国会起草了一份有关该领域到1990年的发展规划报告,其目的是:

- 1.使人们更深入地了解物理学规律、物质的结构及性质、光与物质的相互作用等;
- 2.确保美国能继续在发展新的仪器及技术等方面处于领先地位;
- 3.为其他科学领域及工业和国家的各项规划提供至关重要的实验及理论方法、物理数据;
- 4.把有作为的青年人吸引到AMO物理学的前沿上来工作;
- 5.为大学的、国家和工业的研究所培养物理学家。

该规划试图预言科学发展中最有希望的那些方面,很可能会遗漏一些重要的发展方向。这如同十年前无法对原子、离子的激光致冷;高激发态低能离子;暂瞬分子态;里德堡原子;分子簇;四波混频;相位共轭;超高灵敏度检测技术等

发展做出恰当的估计一样。但专家们相信他们在报告中所提出的确实是近期能促使科学发展的最根本的研究方向。

原子物理学

这个领域有待进一步开拓的三个研究方向是：自然界基本定律的验证及高精度测量技术；多电子原子体系；原子体系的暂瞬态。

1. 基本定律验证及高精度测量

物理学的中心任务是研究自然界的基本定律。原子体系有如实验室，可用以研究时空的本性，验证基本相互作用及自然界的对称性，並在此过程中发展高精度测量的新技术。过去十年中，通过对中子电偶极矩的探查，在新灵敏度水平上验证了时间反演不变性；利用激光干涉法以 10^{-14} 精度证实了空间相对于光速的各向同性性质；在原子中观察到了由弱电相互作用引起的宇称不守恒；通过火箭运载时钟与地面时钟的比较，测量了地球引力对时间的影响，所用时钟的稳定度高于 10^{-14} ；对俘获在电磁陷阱中的单个电子或质子所进行的实验中，测量了电子的反常磁矩，精度高达 4×10^{-8} ，並在 10^{-5} 的精度上对兰姆位移做了重新测量，二者正是目前量子力学所最期望达到的实验验证之一。以上这些实验对测量灵敏度及精度的要求极高，而这些测量新技术经常被用于其他的科学或生产领域。如为验证引力对时间的影响而发展起来的原子钟，现已成为射电天文干涉仪中的关键设备，还可用于制造新型的导航系统，用它来测定在地球上任何一点的位置，精确度可达到10米。而前面所提到的激光干涉仪则可应用于引力波的探测，地震波监测等等。有以下几个主要方面的研究：

基本结构——利用单个粒子陷阱可望使电子磁矩的测量精度提高 10^2 倍。倘若理论计算也能有同样的进展，则将有可能在以 10^{-13} 的精度验证量子电动力学及电荷——宇称——时间（CPT）守恒。此外，探查中子电偶极矩的灵敏度若能再提高 10^2 倍，则将有可能探查时间反演对称性的破坏，其他还有对于粒子——反粒子对称性及原子中弱电相互作用等的研究。

高离化态系统中的量子电动力学——现已能在快离子束中产生只带一个或少数几个电子的高离化态离子，如已获得铀原子的类氢离子。因此，研究辐射效应和相对论效应都很显著的那些量子电动力学现象的时机已成熟。其中包括对强相对论电磁场中束缚态的研究，这是量子电动力学与相对论量子力学都极感兴趣的问题。

奇异原子的激光光谱学——电子偶素的精确

光谱学时代已到来。准确测量这一最基本的两体系统中的兰姆位移及相对论多体效应等已成为可能。最近在真空中获得了 μ 子素，为其激发态光谱学研究创造了条件。这些奇异原子（电子偶素、 μ 子素、 π 子素等）的激光光谱学研究为在纯轻子系统中研究量子电动力学提供了一个新的舞台。

俘获电子、离子及原子——俘获粒子的高分辨光谱技术进步很快。目前已在 10^{-10} 水平上对正、负电子的g-因子进行了比较；有可能测得电子与质子之间质量比的改进值；运用离子俘获技术有可能在更高精度上比较核子的质量，因而可望发展成一种测量中微子静止质量的新方法；俘获离子光谱学能提供对于只有少数电子的系统中的量子电动力学及相对论量子力学以及多电子系统中的电子关联理论等的精确验证；先进的激光技术还能俘获並研究中性原子，还能使之冷却到 10^{-3} K范围，从而有可能观察物质的非寻常状态，如原子的波色凝聚、离子的强耦合等离子体等。同时也为研制新型的原子钟及光学频标等开辟道路。

2. 多电子电动力学

关于多电子原子体系的独立粒子模型建立已有50多年历史。然而在与实验相比较时，发现有很多现象不能用独立粒子模型来解释，这是由于在多体系统中电子——电子相互作用而引起的电子关联运动所致。认识到动力对称在关联系统中的作用，和发现电子关联运动与单电子在强场中运动之间的相似性，这二者正标志着近代理论上的进步。在实验方面已有很大进展。目前已在新型的高分辨电子散射实验中对最简单的多电子体系——双电子体系进行研究；把激光光谱运用于相对论负氢离子束已清晰地观察到关联电子的运动；在双电子体系的多光子电离实验中发现了双电子激发态；利用多束激光技术已有可能产生两个电子同时处于高激发态的原子体系，在那里展现着新型的电子运动；在强场中原子的高激发态光谱显现出意想不到的规律性，它能提供有关关联电子体系性质的重要线索。鉴于有关关联电子运动的实验及理论研究上的进步，着手解决多电子原子体系问题的时机已成熟，它将在化学及材料科学上有着广泛的应用前景。

内壳层光谱学——内壳层缺一个电子的原子，其结构与正常原子有很大差异。有时，关联效应会因双势阱效应而大为增强。由于内层电子的能量要比外层的大 $10^2 \sim 10^3$ 倍，因而这些能态对于研究重原子的相对论效应和量子电动力学效应，研究非稳态的形成及衰变的基本过程等，也是非常理想的。最近在高强度同步辐射光源、真空

紫外激光以及荷电粒子束等技术方面的发展为这一研究领域创造了条件。

高离化态离子光谱学——从事这方面的工作使人们有机会研究相对论效应和量子电动力学效应对核电荷的依赖关系。它有助于更深入地了解基础物理理论及高离化态离子的性质，是高温等离子体诊断的重要科学基础，并为寻找短波段激光提供可靠的途径。最近发明的产生及俘获高离化态离子的方法为精确研究这类重要的原子体系创造了条件。

多光子过程——在激光焦点的强电磁场中将会发生一个原子（或分子）同时吸收几个光子的多光子过程。人们发现红外强激光能产生二次离化的惰性气体离子；在高度关联的中间态上，可能会发生两个电子同时被激发的情况；利用紫外辐射实现了内壳层电子的有选择性多光子电离等等。在这些过程中，光学模与电子模之间所交换的能量比任何已知的化学反应都大。有关多光子过程的理论还很缺乏，但它是关联电子动力学的一个新的分支。

高激发态原子——新技术为研究里德堡原子创造了条件。人们已能着手研究外加电磁场与电子所感受到的原子场尺度情况下的物理学，探讨原子场的新的动力对称，控制并研究电子关联现象等。高激发态电子还可当作高灵敏的探测器，以检测原子的离子实，以及有关分裂能级与连续态能级之间的耦合的量子力学理论。

3. 原子体系的暂瞬态

随着粒子束技术的不断革新、新光源以及分析和数值方法的建立，使得研究原子体系不稳定的暂瞬态的工作得以进行。这些态之所以有意义，是因为它们在本质上是非稳态，必须有相应的理论去描述与时间相关的多电子体系，去描述电子关联效应以及电子与核的能量及动量交换等特殊的时间相关特性。随着对原子、正负离子以及原子碰撞瞬间所形成的瞬态准分子系统中在连续能区的丰富的能级结构的深入了解，传统概念中的束缚态与连续态之间的分界线也就逐渐消失了。这种能级结构出现在诸如自电离、双电子复合、激发态原子及基态原子碰撞期间的组合电离等过程之中。在这类研究中，发现了近似的守恒定律。如电子提升模型就是为了解释在离子——原子碰撞时的那些未知X射线辐射。其他的近似守恒定律则支配着电场中高激发态原子的演化等等。这方面的研究包括：

粒子束碰撞研究——粒子束技术、离子的冷却与控制技术、位置灵敏探测技术等方面的进步为最终研究激发、电离、电荷转移、反应散射等

老问题铺平了道路。准确测量电离、复合等速率是了解宇宙及实验室等离子体的辐射，电荷转移反应所不可缺少的。它们在用中性原子束加热磁约束聚变等离子体中起重要作用。这些技术同时也用于研究原子及离子与表面、固体的相互作用。

激光场中的碰撞——可调谐激光器及飞（ 10^{-15} ）秒光脉冲技术将被用于探测碰撞中的基本过程。这类实验有助于深入了解非弹性碰撞过程、化学反应的本质等等。此外，激光场能诱导原子的跃迁，这就激发了光化学方面的研究。

定量碰撞理论——准确计算碰撞诸特性是碰撞实验研究的重要补充。实际上，对有些体系来说，计算更为方便，而且比相应的实验便宜，如离子的电子碰撞激发等。计算方法、计算机容量及能力等方面的进步为加深对动力学过程的了解提供了很多机会，并为天文物理、等离子体物理及其他应用提供重要数据。

分子物理学

分子物理学目前正处于复兴时期。激光技术、分子束及其他实验技术、新理论等的进步使人们对于分子的基本行为的了解更加深入。这里有两个广阔的研究领域：孤立分子物理学和分子碰撞物理学。

1. 孤立分子物理学

当今的技术发展已能制备处于任何所要求的量子态上的简单分子，这样就能够研究电子在分子场中运动的物理学。有两个主要研究方向。其一是围绕简单分子体系的结构及光谱学进行的研究。对一些不寻常的分子，如范德瓦尔分子、里德堡分子、金属簇分子、亚稳态分子等的研究，给了解分子结构提供了新的机会。人们可望从孤立原子出发，通过原子的二聚体、三聚体直到高集合态的发展过程，了解分子电子态的性质，了解是什么因素决定着由范德瓦尔键所形成分子的几何结构，范德瓦尔分子的几何结构又是如何与晶体结构相联系的，里德堡态分子的能级结构又是如何反映出分子的离子实内部相互作用的等等。其二则着重于电子或离子分别在对方场中的运动行为。分子中的电子云受到核子缓慢振动运动的影响而发生畸变。反之，核子的运动又是在由电子的运动所决定的势能曲面上进行的。孤立分子是基本化学行为的一个缩影。

此外，皮（ 10^{-12} ）秒及飞（ 10^{-15} ）秒激光实验研究能揭示能量如何从分子的一个部分向另一部分流动，如何由有规则的振动过渡到紊乱的振动运动，分子的激发态又是如何形成、发展及衰变的等等。这方面可研究的问题是大量的，如用多

束激光法研究分子的光分解、双共振光谱学、光电子光谱学等仅是这方面发展的一小部分。这方面的研究包括：

暂瞬态分子——短寿命、高活性分子（包括离子、自由基、亚稳态分子等）现已能在超声分子束中产生，並加以仔细研究，这类研究可能有助于人们洞悉化学动力学，並找出控制化学过程的方法。

簇分子——由少数原子到分子，再到凝聚相（固相或液相）的过渡，目前已展开研究。簇分子为揭示由个别的原子向液态演变时的物质行为，为研究催化等提供了强有力的探查手段。它与我们对材料的基本认识有关，也与工业、技术及环境等过程有密切关系。

紊乱运动——处于低激发态的小分子体系显示着有组织的分子内部运动，而处于高能级的分子，其能量的分布则往往是无规的。搞清楚分子从规则运动过渡到紊乱运动的过程，将是分子动力学以及特定态化学反应等方面的重大发展。

反应活性等离子体——即使是简单的、低密度的等离子体，其物理学及化学尚不十分清楚。随着激光技术的发展，诸如速度调制吸收光谱学及激光频率调制光谱学等，为探索这类等离子体的动力学开辟了道路。人们现在已能够测量等离子体中离子传输性质对量子态的依赖性，研究分解复合，观察激发态原子、分子及离子与表面的相互作用等。

激发态动力学——利用激光选择性激发，已能很容易地获得分子的某些个别的量子态，它们的动力学可被仔细地研究。飞秒光谱学能将振动着的分子“冻结”，从而有可能研究能量在一个分子中如何流动。

真空紫外及X射线的光电离——同步辐射光源被用于研究分子光电离的基本动力学参数，包括分支比、角动量分布、自旋状态等。研究工作已扩展到分子实的结合能在X射线波段的那些能级、能量分辨率能做得很高，足以分辨多原子分子中不同的振动模态。若把激光技术与同步辐射光源相结合，则将开拓出一个新的领域，研究分子实处于激发态时的分子电子动力学。

2. 分子碰撞物理学

在当前的实验与理论水平上已能在量子态能被充分分辨的条件下研究分子碰撞问题。现已能产生各种非寻常分子的分子束，如处于振动高激发态的分子及分子离子，范德瓦尔分子等，供碰撞研究之用。利用激光技术能使分子分解，这相当于所谓“半碰撞”过程，只有在分解产物分开时发生动态相互作用。这类研究将涉及分子反应中

最基本问题之一：有用的能量及角动量在反应物中如何分配？这方面的发展将对简单化学反应物理学有新的、更深入的了解。有关课题有：

态—态化学——利用真空紫外激光有可能在态—态基础上研究氢的化学，並与动力学的全量子力学计算结果进行比较。有关较重体系的新的态—态实验研究将了解简单分子在碰撞中平动、振动以及转动能量之间的相互影响创造了条件。

激光作用下的碰撞——在分子发生碰撞期间，吸收激光和发生辐射将会大大改变碰撞的进程。这为研究化学反应的细致发展提供了新的机会，並为激光控制反应产物的研究开辟了道路。

“半碰撞”过程研究——过去十年中，利用紫外或可见、红外激光的多光子吸收已能将多原子分子击碎。粒子在飞散时就象刚发生过碰撞似的，因此光分解可看成是半个碰撞，而且此时反应生成物的能量及角动量是准确可知的。这就为研究碰撞动力学、研究自由基的发展提供了新的途径。其结果涉及到燃烧、大气化学等一系列问题。

光学物理

新激光器及光源的发明、激光光谱学及非线性光学的发展、以及这些新技术在科学和实际中的应用日益扩大等等，共同把光学物理推到了现代物理学的前沿。为确保此领域不断发展，这里提出三个主要研究方向：新光源、高等光谱学、量子光学。

1. 新光源

过去十年大量的新光源被广泛用于科研、生产、国防诸领域。如半导体激光被用于发展高分辨红外光谱学及光纤通讯；可调谐染料激光器引起光谱学的革命，使其分辨率提高成千倍，它还能制备过去无法获得的激发态原子、分子及离子，並加以研究；准分子激光被用于光化学过程；钕玻璃激光用于激光热核聚变的研究等等。其主要研究方面有：

短波长激光器——原子、分子的多光子激发有可能产生远真空紫外或X射线波段的激光辐射。这类相干光源将推动原子、分子光谱学及材料科学的研究、全息摄影、激光武器等的进一步发展。

非线性过程——远紫外的相干辐射也可以通过近紫外激光在脉冲气体射流中的多次倍频，或在气体中的四波混频等非线性方法而产生。这种光源能在某些波段提供极强的光，而设备则比同步辐射小得多。

短脉冲激光——目前已能产生19飞秒的光脉冲。它可用来研究分子、固体、生物体中那些依

赖于时间的基本过程，还能为发展超快电路提供一种新技术。

2. 高等光谱学

由于受新激光、新光源发展的刺激，原子、分子及材料光谱学在过去十年中取得了革命性的进展。如利用饱和光谱学和双光子无多普勒光谱学等技术可消除多普勒线宽的影响，再配以稳频调谐激光器，可使光谱分辨率提高 $10^3 \sim 10^6$ 倍；光频计数法已达到极高的精确度，从而使长度单位米的定义发生了根本性的变化，以前是以氪的谱线波长来定义的，现在则要以光在某段时间间隔中所传播的距离来定义；光散射光谱学在凝聚态物理中被广泛运用，特别是用于临界现象的研究，其他还用于化学、生物学、工程及医学等等；多光子光谱学被用于研究新的原子或分子态，由于它的探测灵敏度极高，已发展成超痕量分析技术，能检测含量仅有 10^{-12} 的痕量元素。此法还用来测量太阳的中微子流等。这方面的课题主要有：

超高精密光谱学、无多普勒效应光谱学、超高灵敏探测等。

3. 量子光学

了解光的统计性质、光和物质的电动力学等是了解光的产生及传播、信息传递、以及其他物理过程的核心。有以下研究方向：

新统计态光的制备——掌握了控制光的统计性质就有可能产生出新型的光。它的发展，特别是在压缩态上产生的光，可被用于量子度量学及通讯。

光学双稳——光学双稳设备为研究从稳态间混沌运动的这一过渡提供了新的机会。光学双稳在包括新型光学逻辑元件在内的光学处理中有很大的应用前景。

长波长电动力学——利用高激发态原子可观察在微波及毫米波段的新辐射过程。它可用于研究从不可逆到可逆运动的演化，自然界中基本的噪声源——自发辐射源将能被抑制。

· 科技动态 ·

日本科学家研制成陶瓷超导纤维

一位日本科学家首创挠性陶瓷超导纤维，而研究人员们今天说，这项开发有重要的长远的意义。

日本科学家眼目在艾尔弗雷德的纽约州立陶瓷学院召开的一次会议上说，新研制成的这种纤维能够载电流。

玻璃科学教授威廉·拉库尔斯说，“他开发的确实是一项重要的技术。”

科学家们说，这种新的超导电缆与普通的铜线相比，实际上无电阻，电损耗小，可用于未来的产品，诸如充电一次可行驶一星期的电动汽车和运算速度更快的先进的计算机。

眼目是京都大学化学研究所所长，他是15日在艾尔弗雷德举行的历来规模最大的技术会议上报告他的成果的。

来自15个国家的250名研究人员出席了这次“玻璃熔化技术进展”讨论会。

眼目说，他已经申请这个方法的专利，这个方法是使用一种液体和明胶化合物制造超导纤维而不是在加热炉里制作。

眼目说，“我们发现了一种优质的原料溶液，这种溶液很粘，我们可以从这种溶液抽拉纤维，这种纤维是超导体。”

艾尔弗雷德的玻璃科学和工程技术研究所所长拉库尔斯说，眼目的方法对制作用于发动机线圈的超导纤维是特别重要的。”

（转载自新华社《世界经济科技》）

从海水回收锂的新技术

工业技术院四国工业技术试验所开发了从海水高效率吸着和采集锂的方法。

当前用于电池和合金的需要量在增加，现在靠从进口的矿石中提取。这次开发的新方法可望达到实用，确保锂资源。

该研究所现在应用的进行实验的方法是把加工氧化锰的吸着剂放在海水里，使之吸着锂，到吸着为止的过程已经确立，但是从吸着剂上回收锂的方法存在问题，所以这次研创了新的放出方法。

过去的方法是使用稀释的酸放出剂，缺点是吸着剂也被溶解了。这个新方法使用氮化合物。这种化合物在30摄氏度以上即分解，发生氧气，这有防止吸着剂溶解的作用。

1吨海水中含锂170毫克。该试验所的实验，平均1克吸着剂采集了约4毫克锂。由于抑制了吸着剂的溶解，可反复利用，实用价值极高。

（转载自新华社《世界经济科技》）