

90年代物理学



原子、分子物理学和光学

〔美〕物理学评述委员会

科学出版社

目 录

概要	1
第一章 倡导研究计划	6
本领域的特征	6
本报告的组成	7
关于倡导研究计划的介绍	7
原子物理学方面的倡议	8
基本检验和高精度技术	9
多电子动力学	12
原子体系的瞬态	14
分子物理学方面的倡议	16
孤立分子物理学	17
分子碰撞物理学	20
光学方面的倡议	21
新型光源	22
高等光谱学	24
量子光学	25
第二章 当今美国的原子、分子物理学和光学	27
原子、分子物理学和光学的人员统计	27
本领域的规模	27
雇用人员的配置	27
研究力量分布状况	28
原子、分子物理学和光学在教育上的作用	28
交叉学科和应用	29
原子、分子物理学和光学的经济效益	29
美国原子、分子物理学和光学领域的状况	33
第三章 建议	35

背景——拨款的历史	35
评价	39
行动计划	40
建议	42
基本财政支持	42
仪器设备	43
理论	45
增加大型计算机	45
特种设备	46
基于加速器的原子物理学	46
运用同步辐射的原子、分子物理学和光学	47
原子、分子物理学和光学研究与拨款机构的关系	47
国防部	47
能源部	48
国家科学基金会	49
国家航空和航天管理局	50
第四章 原子物理学	51
基础原子物理学	51
量子电动力学进展	52
电子和正电子的磁矩	53
氢的兰姆移位	53
μ 子素和电子偶素	55
μ 子原子和强子原子	55
时间反演对称性	56
原子物理学中中性流宇称不守恒	56
量子理论基础: 量子力学是完备的吗?	57
时间和空间的研究	58
将来的方向	59
原子结构	60
松束缚原子态	60
强场中的原子	62
双阱原子势	63

集合原子态	64
原子中的相对论效应和量子电动力学效应	65
原子动力学	66
电子连续能谱的结构	67
双电子复合	69
超慢碰撞	70
与里德伯原子碰撞	71
近似守恒定律	72
趋向于完善散射实验	73
正电子散射和电子散射的比较	73
基于加速器的原子物理学	74
原子相干性和不圆的原子	74
多荷电体系的量子电动力学	75
瞬态超重体系中粒子对的产生	76
内壳层分子轨道和分子轨道 X 射线	76
电荷转移	77
慢反冲离子的产生	78
可调谐 X 射线	78
要求较大设备的原子物理学	79
基于加速器的原子物理学	79
运用同步辐射的原子、分子物理学和光学	81
第五章 分子物理学	83
新颖光谱学	83
电子结构的新观点	85
电子结构理论: 从头 (<i>Ab Initio</i>) 计算	86
氢键分子	87
多原子分子的振动结构	88
分子光致电离和电子-分子散射	89
分子的光致电离	89
分子自电离动力学	89
分子场中的形状共振	90
共振多光子电离	91

电子-分子碰撞	92
分子动力学	93
态-态化学	93
辐射碰撞	95
了解化学反应动力学的新途径	96
变分的过渡态理论	98
准经典弹道计算	98
近似的量子散射计算	98
简单反应复合体中的共振	99
键断裂和“半碰撞”	99
在极低温度下的反应	100
一些新颖的分子物种	101
分子离子	101
范德瓦耳斯分子	102
第六章 光学	103
激光器——革命还在继续	103
准分子和准分子激光器	106
激光光谱学	107
超精密激光光谱学	107
超灵敏光谱学	108
无多普勒效应的激光光谱学	108
激光致冷	109
相干光学瞬态	111
超窄光学跃迁	111
相干拉曼光谱学	112
量子光学和相干性	112
光子反聚束	112
光学双稳性	113
压缩态	114
里德伯原子和空腔量子电动力学	115
飞秒光谱学	117
第七章 交叉学科	118

天体物理学.....	118
原子过程	120
里德伯原子	120
星际分子	120
天体物理化学	121
宇宙论	122
空间物理	122
凝聚态物理学和材料科学.....	123
光散射光谱学	123
团簇	125
超窄光学跃迁	126
自旋-极化的量子流体	127
表面科学.....	128
分子束表面散射	130
金属团簇	130
用激光研究表面	132
原子、分子物理学和光学数据在表面科学中的作用	133
等离子体物理学.....	133
大气物理学.....	135
核物理学.....	136
原子核的光学研究	137
极化的核源	139
原子-原子核前沿领域的动力学	139
第八章 原子、分子物理学和光学的应用	141
精密计量技术.....	141
聚变.....	144
磁约束	146
惯性约束	147
国家安全.....	148
光纤通信.....	151
激光加工.....	152
材料处理.....	154

激光诱导的表面化学	154
离子注入	155
数据库服务机构	155
医用物理	157
激光外科	157
磁共振人体成象	158
进一步的读物	162
索引	163

概 要

本领域的特征

原子、分子物理学和光学(AMO 物理学)的任务是,阐明物理学的基本定律,了解物质的结构和在原子、分子水平上研究物质的演化,从光的现象了解它的实质,以及创造新技术、研制新器件。AMO 物理学为许多相邻学科,如化学、天体物理学、凝聚态物理学、等离子体物理学、表面科学、生物学和医学,提供理论方法、实验方法和基本数据。它对国家安全体系、国家核聚变计划、指导性能源和材料研究作出贡献。AMO 物理学中的发现,使激光器和诸如光学加工及激光同位素分离等先进技术已经成为可能,而且这方面的研究为新的产业如光纤通信和激光辅助加工奠定了基础。这些发展,预计在未来的若干年内,将有助于国家维持它的工业竞争力和军事力量。

在教育上的作用

AMO 物理学在美国大学本科生和研究生阶段的科学家培养中起着重要的作用。大学里的 AMO 物理学研究,为学生们在产业部门、国立实验室及大学里的基础科学和应用科学方面的任职作了准备。每年大约有 140 个博士学位是在 AMO 物理学领域授予的。

对国家计划的贡献

AMO 物理学为国家能源计划作出广泛的贡献。采用磁约束或惯性约束的核聚变研究,需要 AMO 实验室提供实验数据和理论数据。光谱学和激光散射是等离子体聚变装置的重要诊断技术。惯性约束实验使用了带电粒子器件和高能激光器,而后者起源于

1107029

AMO 的研究。应用现代光学方法,可以在发动机的运行中研究燃烧化学,从而提高飞机、船舶和汽车的效率。

AMO 物理学的基础研究,使军事技术的重要领域发生了革命性变革。原子钟和激光陀螺仪是现代导航和全球定位系统的核心设备;光纤通信广泛应用于船舶、坦克和飞机上。AMO 实验室提供的关于原子过程和分子过程的数据,对理解大气和气象现象是十分重要的,这些现象影响到军事方案的制定。激光器已用于测距、导航、光学雷达和其他许多应用中;高能激光器正用于新型的对抗武器和能量可控的武器系统。

AMO 研究还为国家环境规划作出贡献。AMO 实验室所提供的原子和分子的数据对理解大气化学起着决定性作用。采用激光和激光光谱学的遥感手段,可以在远距离内监视污染物。我们对于电离辐射对生物体系的影响的理解,有许多是建立在 AMO 物理的数据和理论研究之上的。

基础 AMO 科学的新进展

AMO 物理学包括对光和对物质在原子、分子水平上的理论研究和实验研究的广泛领域。原子物理学新近的一些进展,包括奇异原子的光谱学,通过对单个俘获的电子和正电子的超精密测量所做的量子电动力学新检验,极慢速、多荷电(高阶电离)离子的产生,对强核场中自发形成电子-正电子对的预言和研究,以及对双电子复合的首次直接测量。分子物理学的进展,包括分子离子的一般研究技术的开发,团簇(孤立分子的小基团)的形成,超声分子束表面散射,以及多原子分子中能量定域化的发现。光学方面的进展,包括对光学跃迁频率的首次直接测量,原子、分子的超精密光谱学,超灵敏检测技术的发展,离子和原子的激光致冷,相干远紫外光的产生,光学双稳性,以及许多新型激光器和非线性光学技术的产生。这些发现和许多理论进展(包括由计算机的应用而变得可行的新方法)结合在一起,使 AMO 物理学过去的10年成为具有实质性科学进展和空前丰收的阶段。

研究机遇

AMO 物理学的范围正迅速扩展到原子、分子的结构和动力学,光的控制和产生,以及物理学的基本定律等广阔的研究领域。从 AMO 物理的许多活跃领域之中,专门研究小组指出了一系列可望得到迅速发展和能够取得较大科学成果的专题。这些专题构成了在这份报告中将详细阐述的倡导研究计划的基础。原子物理方面的倡导研究,包括对物理学基本定律的检验、高精度技术的发展以及关于多电子问题与原子碰撞动力学的研究。分子物理方面的倡导研究,则集中于了解分子场中核与电子的运动,以及在分子碰撞过程中控制能量和粒子交换的可能性。光学方面的倡导研究,包括从红外线到 X 射线区的相干光源的开发,光谱学新方法及量子光学研究。

本计划的用意是为了提高我们对基础 AMO 科学的认识,保证这一领域能够继续为其他学科提供基本的数据和新的技术,并且让 AMO 物理学继续为国家重点项目和工业界作出贡献。此外,对于为工业界、政府实验室和大学中专业人才的培养提供必要的研究环境来说,这个计划也是必需的。

研究工作应优先考虑的事

美国 AMO 物理学的发展,主要是由致力于课题高度分散的科学家小组所推进的。300 多个这样的小组正在大学、国立实验室和工业实验室进行这种研究。

美国 AMO 物理学的强大力量归因于众多高质量的小组。经过过去10年严酷的筛选,留存的小组也面临缺少资金和设备的严重威胁。为了确保美国能够获取 AMO 物理研究中的科学机遇,首要的是继续保持优秀小组的活力,同时为年轻的科学家进入这一领域创造机会。

建议

我们的主要建议是,给予原子、分子物理学和光学倡导研究

计划的专题以基本的财政支持。已经选定了8个这样的专题。如同这份报告所述,已经提出了一个关于这些专题的四年计划。到四年终了时,这些专题将有总数约140个小组在从事新的研究工作。考虑到各专题的广度,每个专题中形形色色的科学机遇,整个领域的范围以及需要适当数量的新科学家进入这个领域(可能各个专题每年要一位),140个小组为数并不大。在四年计划期结束时,这个领域应达到原有工作逐步结束,新的工作得以开始的平衡运转。

这些数字是指引总体研究强度的目标,并不意味着定出每项拨款的准确数额,规定研究小组的精确数目和规模,或各个专题开始研究的时间表。

对倡导研究的财政支持

对 AMO 小组贯彻倡导研究计划、推进研究工作来说,增加拨款是必不可少的。这些基金将资助研究生、博士后人员和其他专职科学家;帮助恢复严重削弱了的工场基本设施、技术员和特殊的维修服务;定期购置和维修设备;支持学者互访并允许研究小组有足够的灵活性进行新的前沿课题研究,而不必像现在常要拖延两三年才能开始。为了进行新的研究,在今后四年中对基础 AMO 物理的财政支持每年需要增加 700 万美元(1984 年美元标准)。

倡导研究计划的仪器

现在美国大多数 AMO 实验室的仪器已经陈旧,重要的科学机遇正在错过。这一情况日趋严重。如果不想削弱研究的势头,就必须加紧提供新的仪器。

前面关于增加基本财政支持的建议,意在使各研究小组能定期更新和维修仪器,但却不足以重新装备陈旧的实验室。为此,需要特别的一次性拨款。为了装备 AMO 实验室以追逐主动权,应该在今后的四年中每年提供 1100 万美元(1984 年美元标准)的特别拨款,用来购置仪器。

理论

同欧洲、日本和苏联的情况相反,美国的原子理论研究团体较小而且非常分散.迫切需要集中力量,把理论研究提高到能指导和解释实验研究的水平.专门研究小组建议有关机构应吸引并支持提出这一问题的动议,例如建立中心、专题讨论会或夏季学校,使学生和有活力的理论家可以在不同时期聚在一起。

增加大型计算机

由于使用大型计算机而变得可能的新方法,深刻地改变着 AMO 物理学,但理论原子物理学界缺少计算设备,严重阻碍着这一领域的活力.根据对潜在用户的估测,专门研究小组建议为 AMO 物理学家提供相当于一台 Cray 1 计算机全天工作四年以上的机时,并配备高速遥控存取设备。

特种设备

基于加速器的原子物理学和使用同步加速器光源的研究,需要比过去 AMO 计划已经提供的更为昂贵的设备.这两个专题都有引人注目的科学机遇。

专门研究小组建议,征集并支持创制多荷电离子源和更新加速器,其总费用估计要 1 200 万美元.专门研究小组还提议,支持为现有的同步辐射光源制造插入设备,使 AMO 科学家们能够实质性地使用这些光源.专门研究小组赞同研制真空紫外线和 X 射线的下一代光源,并提议向 AMO 科学家提供光束管道。

第一章 倡导研究计划

本领域的特征

原子物理学、分子物理学和光学的中心任务,是阐明物理学的基本定律,了解物质的构成和它们在原子、分子水平上的演化,了解光和物质的相互作用,以及发明新技术、研制新器件。AMO 物理学是联结物理学与天文学、化学、高层大气物理学和生物物理学的科学桥梁的一部分。

由原子、分子和光的研究而创立的实验和理论技术,常常为物理学的其他方面——核物理、等离子体物理、大气物理、凝聚态物理、表面物理和高能物理——以及别的学科所采纳。AMO 物理学产生的数据,包括精确测量的自然界基本常数,是所有自然科学必须遵循的基本知识的重要组成部分。AMO 物理还扩展到应用科学的广阔领域。例如,它对国家安全系统和国家能源计划作出贡献。AMO 物理实验室发明的先进技术导致了新型产业的发展。这些新型产业为保证美国在国际上日益增强的挑战面前保持工业领先地位是极其重要的。

AMO 物理学在美国大学本科生和研究生水平的科学家培养中起着重要作用。大多数设在学院和大学校园中的 AMO 实验室培养出了国立实验室和工业实验室的许多物理学家。在 AMO 物理学领域,每年大约授予 140 个博士学位。其中许多人帮助推进国家能源、军事和环境研究计划事业。

AMO 物理学是一个极为多样化的领域,这种多样性正是它知识活力的基本源泉。AMO 物理学和邻近学科领域内部不同研究分支间的相互影响,在全书中常常表现出来:电子和正电子的量子电动力学实验,推动制造原子钟和建立光学频率标准的新技术;在高能的原子碰撞及基本的化学反应中,发现内壳层过程

之间的紧密联系;在实验室中用低能离子进行的实验,引起对基本天体物理过程的重新考虑。整个 AMO 物理领域十分明显地体现出科学的整体性。

AMO 物理学的影响扩展到科学和工程的其他方面。引用一例: 在本领域中就有许多出色的青年科学家目前在化学部门工作。这种扩展标志着 AMO 物理学方法被用来了解各种自然现象的认识能力的日益扩展。虽然化学家从原子碰撞理论中或者通过原子束碰撞实验能够发现化学反应的新观点,但是这个学科还有一个重要的核心要用物理学家的方式来处理,这就是探索自然界中的统一性和普遍性。化学家和生物学家需要原子物理学家的洞察力,去阐明物质的和有机体的性质的多样性。这意味着,不管其他科学和工程多么广泛地采纳了物理学的成就,那里仍然需要物理学家的参与。

这份报告想要提供一个关于 AMO 物理学各方面无偏倚的描述,勾画它在国家基础科学、应用科学和技术规划中的地位,指明这一学科发展的几个有希望的专题以及阐述实现这些机遇所需的步骤。

本报告的组成

本章其余部分的用意是,描述为确保 AMO 物理学作为一门科学继续发展并符合国家重点需要而制定的倡导研究计划。AMO 物理学的倡导研究工作将在本章最后三节中叙述。第二章讨论美国 AMO 物理学的状况;第三章提出确保这一领域继续保持势头和完成倡导研究计划的建议。本报告的主体是在第四、五、六章分别概述原子、分子物理学和光学方面最近的科学活动,以及在第七、八两章分别叙述 AMO 物理学同其他学科的交叉联系及 AMO 物理学的应用。

关于倡导研究计划的介绍

AMO 物理领域包含各种各样的科学机遇。这一领域的活力

就在于追寻这些范围甚广的机遇。我们在这里描述的倡导研究计划,是为了支持科学创新和提供能使科学迅速发展的环境。这一计划的目标是:

- 提高我们对物理学定律、物质的结构和性质以及物质与光相互作用的认识;

- 确保美国在新设备、新技术的发展上继续领先;

- 提供对其他学科、对工业及国家计划都极其重要的实验技术、理论技能和物理数据;

- 吸引有能力的男女青年到原子、分子物理学和光学的前沿领域中来;

- 为大学、国立实验室和工业实验室的发展培养物理学家。

我们在准备这份倡导研究计划时意识到,企图预言科学发展最有指望的途径很可能反而会错过最重要的发展。例如,假如我们10年前写这份报告,就很可能漏掉或严重低估了在过去10年中有重大进展的许多方面:例如原子和离子的激光致冷,低能多荷电离子,瞬态分子态,里德伯原子,分子团簇,四波混频,相位共轭和超灵敏检测。以上列出的成果还可以很容易地加以扩充。它表明,10年前,AMO物理学的发展快得无法对其进行知识可及的预测。今天这一领域的发展显得更为快速。但不管怎样,我们相信这份倡导研究计划仍能代表近期科学发展的可靠基础。

因为AMO物理学是一个如此多样的领域,而且如此之多的各种专题获得科学成果的潜力很大,所以这份计划需要涉及的范围十分广泛。幸好AMO物理学的基本研究一般是由人数少的小组而不是由人多势众的科研队伍进行的。大范围活跃的前沿研究能够由个别人按计划来工作,用当代物理学的标准来看,其费用就很少了。

原子物理学方面的倡议

实验和理论的迅速发展,在原子物理学的许多方面开辟了新的研究前沿。我们选择了基本科学探索的三个专题,开发如下的

新机遇:

- 基本检验和高精度技术——把原子作为研究时空基本特性的实验室,检验自然界的基本相互作用和对称性,并创造高精度测量的新技术。

- 多电子原子——一般通过电子运动相关性的说明,获得对多体体系的物理理解和定量描述,并把这一概念加以扩展,以帮助解释原子在分子或其他更复杂的体系中的动力学行为。

- 原子系统的瞬态——定性和定量描述中间态、不稳定状态的物理本质,原子碰撞中的能量交换、角动量交换和粒子调换,以及了解高度相关的中间态的作用。

基本检验和高精度技术

物理学的格局(指不同物理学领域的理论和实验技术)相差甚远,但整个物理学的中心是研究自然界的基本定律。这些研究在原子物理学中起着明显的作用,而且这方面的研究处于很高的水平。例如,在过去10年中,时间反演不变性在新的灵敏度水平上通过寻找中子的电偶极矩得到了验证;光速的空间各向同性性质已被激光干涉所证实,精确到10的15次方分之几;弱电相互作用中的宇称不守恒已从原子中观察到,地球引力对时间的影响也用稳定性大于 1×10^{-14} 的火箭运载时钟进行了测量(见图1.1)。这些牵涉到特别高灵敏度测试的实验,常常产生对其他学科和工业部门也有应用价值的技术。如原来为检验时间的引力效应而发展起来的原子钟,现已在配备甚长基线干涉仪的射电天文学中发挥关键作用。原子钟还使一种能在地球上任何地方测出自身位置而误差大约为10 m的新型导航系统成为可能。与空间各向同性检测相结合发展起来的高精度光学干涉计量术,在从引力波检测到地震监测的宽广范围中都得到了应用。

对量子电动力学(QED)极限的高灵敏测量是AMO物理学领域最重要的任务之一。理论与实验之间的比较已达到物理学世界中独一无二的精度。曾在理论物理学的最雄心勃勃的计算之一中

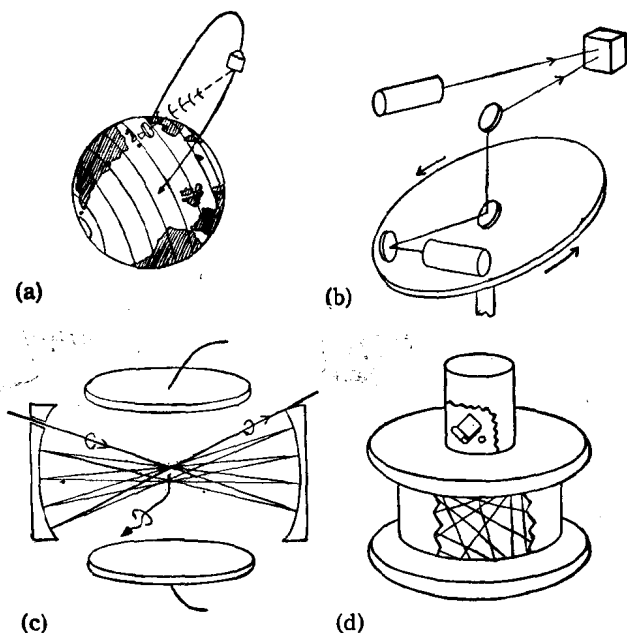


图 1.1 对基本原理的四项检验。

(a) 引力和时间。根据广义相对论,引力减慢时间。地球引力的影响是微乎其微的:一只放在地面上的钟只比处于自由空间的相同的钟慢 7×10^{-10} 。然而,这种效应还是由置于高轨道火箭上和放在地面上的两个相同的原子钟走时的对比高精度地测量出来了。(原子钟利用原子的自然频率控制振荡器速率。)在实验中,这两个钟保持着 10 的 15 次方分之几的精度,即大约 1 000 万年相差 1 秒钟。原子钟是现代导航和全球定位系统的重要组成部分,它们还在甚长基线射电天文学中起着举足轻重的作用。

(b) 光速到底有多稳定? 爱因斯坦主张,光速在真空中是一个普通常数,不受光源和观察者运动的影响,这一主张已被接受为物理学的基本定律。然而,正像所有这类定律一样,它的正确性依赖于仔细的观察。光速的各向同性已通过比较几台高度稳定的激光器在其相对方向改变时所发出的信号而得到了证实,精度为 10 的 15 次方分之几。与这个实验中所用到的相类似的激光稳定技术,在从精密光谱学到新型计量学和通信中都有应用。

(c) 原子物理中的宇称破坏。弱电理论统一了以前相互独立的电磁作用和弱相互作用的描述,这是现代物理的一个里程碑。根据这一理论,自由原子由于所谓宇称破坏的相互作用而能够表现出对左旋或右旋的固有偏爱。如果没有弱电相互作用,自由原子的宇称破坏就会被严格禁戒。原子宇称破坏的效应已在法国、英国、美国和苏联的实验室中测得。在图 1.1 所示的实验中,宇称破坏相互作用使得由激光激发的原子所辐射的光成为圆偏振的。这个实验