



“新时代的物理学”

——美国科学家的思索、检讨和建议

童国梁

(中国科学院高能物理研究所 100039)

在世纪之交时刻,美国科学家认真地对物理学和其他相关科学进行了审察,写出了他们的思索、检讨和建议^{*}。这里对此作一简单介绍,希望给我国的科学工作者和有关人士带来一些启迪。

物理学已经进入机遇迅速膨胀的新时代,其对科学、技术和国民经济的冲击力不断增强。这个结论是美国国家研究委员会(NRC-National Research Council)的物理学审察评议委员会(PSOC-Physics Survey Overview Committee)在评估了NRC对最近10年物理学的通盘审察后得出的。

NRC在1986年出版的“90年代的物理学”中公布了他们对90年代的展望。在1990年代初,物理学和天文学分部继承了通过新一轮审察定期对物理学进行评估。在新一轮审察中,物理学各分支的报告分卷汇成了一个系列。其中的第一卷于1994年完成,最后一卷于1999年完成。这系列取名为“新时代的物理学(Physics in A New Era)”。

当最后一卷完成时,NRS委任了PSOC(成员名单列在文章最后)。1999年2月,PSOC举行了第一次会议。PSOC广泛咨询了国际物理学界和全美科学界和学术界的领袖人物,并由NRC选定的专家对此委员会的工作进行了复审。

2001年6月,美国国家科学院出版社出版了PSOC的“新时代的物理学:纵览”的报告。“纵览”评估了物理学的整体状态,确定了6个高优先级的研究领域,并提出了9个专门建议。由集体设计的这些建议不仅是为了加强美国的物理学,同时也是为了凝聚物理学家服务于国家重大需要的能力。

物理学的新时代

20世纪物理学的进步与突破丰富了整个科学,开辟了科学发现的新时代。物理学几乎已经渗透到

从保健、国家安全和我们对地球环境了解的社会的各个方面。它们把我们引入信息时代,刺激了广泛的技术和经济发展。过去20多年中物理学上的发现节奏明显加快。高灵敏、观察范围深度延伸的新仪器不断出现并得到了使用,许多微观器件作为应用的载体正在获得发展。物理学与整个科学,特别与生物科学形成了强有力的联系。

物理学正在成为全球化的事业。这一变化反映在其所需设备的建造若由任一国家独立承担的话是太大、太复杂、太贵了;另一方面,全球化很大程度上也是现代信息技术发展的结果,而信息技术恰恰是现代变化的心脏。

我们正处于一场信息革命之中,我们相信这是一场就像过去两次伟大的技术革命——农业革命和工业革命一样深刻。依靠几个物理学领域发展起来的信息技术正在改造着社会和改变着经济。最初作为高能物理研究的全球协调工具而发明的全球网(World Wide Web)现在已成为无所不在的通讯工具,并给教育和商业以崭新的形式。信息技术总收入估计占美国国内总产值(GDP)的5%—15%,并且占美国今日工业资本消费的40%。

物理学的工具正在不断增加其应用的能力和广度。由加速器物理学家发展起来的最早用于凝聚态物理学研究的同步辐射光源现在正大量用于结构生物学研究。下一代粒子对撞机将揭示TeV能量范围下的新的尚不清楚的物理。精良的计算机硬件和改进的模型技术(modeling)可以模拟托卡马克(Tokamaks)中的湍流等离子体以及大气动力学。在显微镜的尺度下,离子阱和原子冷却技术可以产生没有热扰动的原子系统,量子力学接纳了玻色-爱因斯坦凝聚态。原子力显微镜有可能画出原子排列的物质表面图像。凝聚态物理学家已开始把他们研究的物质的尺寸缩小到分立的量子激发起决定性作用的区域。一场二次量子革命正在进行,它在纳米的尺

^{*} Thomas Appelquist & Donald Shaper, Physics Today, November 2001, 34

度下把凝聚态物理学和原子物理学联结到一起。

物理学的延伸达到了未曾有过的范围, 提出的问题也显得空前地雄心勃勃。高能物理学家建议一种有吸引力的机制以产生基本粒子的质量, 并用实验加以验证。他们的许多思想得自凝聚态物理学, 在那里, 那些相同的想法被用来了解高温超导那样深层次的问题。宇宙学家在了解宇宙起源以及通过仔细测量宇宙背景辐射和原始的元素丰度来检验他们的理论方面取得了巨大进步。弦理论家正在发展一种能容纳基本粒子物理和重力物理的“包罗万象的理论”。

随着节奏的加快, 物理学家的的工作已越来越不能把自己局限在物理学的某个子领域, 或者说, 甚至不能局限在物理学科上。正如前面提到的, 凝聚态物理学家和原子物理学家已经找到了公共的基础。宇宙学中困惑的问题把天文学和物理学联结到了一起。例如, 解释早期宇宙各向同性膨胀的观点正是受到能给基本粒子赋予质量的类似的理论所驱动。

对于控制生物的分子机制的了解使得生物学、化学和物理学融为一体。强有力的技术手段, 例如光镊, 使科学家能够测量 DNA 分子的弹性常数。物理学、化学、数学及计算机科学, 不仅为生命过程提供了新的发现, 而且开阔了新的视野, 这些新视野又促进了生命科学的巨大进步。

对生命科学的最大挑战之一是解码人类基因和了解活的细胞如何把该码输送到物质和生命过程中去。正如顶级生物学家、前美国国家健康研究所所长哈罗德·瓦姆斯指出的, 面临上述挑战, 作为生物学支柱的物理科学必须继续发展。

社会的需要

NRC 审查系列报告的题名“新时代的物理学”不仅表明物理学本身已在成就和影响上达到了新水平, 而且意味物理学界在社会上的职责也正在迅速改变。为保持物理学的繁荣和以生机勃勃的面貌进入新时代, 物理学界必须敏感于这些变化, 并要有效地回报社会的需要, 特别要对有科学素养的大众和对加强国防的需要作出回报。

了解物理科学的基本知识对普通公民正变得愈来愈重要。现在他们面对的问题是十分广泛的: 从愿意为一个节能型空调付多少钱到关于常常与公众对立的核反应堆工厂的立法这样一些事情。几乎所有技术都是建立在科学原理的基础上的, 向人们提供合适的科学素养和技术知识是物理学界最重要的

任务之一。高等物理教育对造就杰出的技术劳动力是必不可少的, 继续发展满足这种需要的适当的高等教育将付出巨大的利息。物理学界现在正进一步动员起来改进大学的物理教育。

美国的国防形势正处于一个革命时期, 由于在 2001 年突发的 9.11 事件变得特别紧急。侦查、新式密码系统、核贮备的老化、通讯电子学、反恐怖主义、弹道导弹防御现在均处于政府和物理学界双方关注的焦点。

物理学家正在直接卷入国防技术, 例如激光、导航和卫星技术。他们同样也通过基础研究的许多领域, 例如支持现代材料、电子学和遥感系统, 间接地为国防出力。科学家从事的基础研究同样在估价由技术进步带来的威胁和机会中扮演了极其重要的角色。国防部(DOD)的研究和能源部(DOE)的实验室双方传统强调的核心资源和长线基础研究均已遭受削弱, 必须扭转这种令人遗憾的趋势。

6 方面重大挑战

物理学取得的成就、物理学仪器不断增加的能力以及它对其他学科的渗透产生了前所未有的机遇。在 PSOC 的结论中说, 其中有一些已非常有希望取得国家优先级地位。他们挑出了 6 方面“最重大的挑战”, 这些覆盖了物理学以及相关的交叉的学科和工程。它们是: 发展中的量子技术, 创造新材料, 了解复杂体系, 统一自然界的各种相互作用力, 揭示宇宙, 把物理学用到生物学。这些挑战的选择基于它们自身的科学重要性、它们的影响和应用的潜力以及对它们在今后 10 年可能达到的主要进步的展望。对其中的每一挑战, 最近的理论进展已揭示出一些新问题, 并已为进一步综合设置了舞台。对每一挑战, 在不久的将来所能看到的前景均取决于高精度或很高能量仪器以及强有力计算能力的出现。

深入了解和重要应用

操作单个原子和分子的能力将导致一种新的量子技术, 这种技术可用于从发展新材料到分析人类基因的广大领域。例如, 对个别原子的操作与激光捕获和蒸发冷却技术结合产生了有趣的玻色-爱因斯坦凝聚态, 在这种物质态中, 许多原子处于相同的量子力学态, 并有很大的空间重迭和缠结。在气态玻色-爱因斯坦凝聚态中, 量子重叠有时会延伸到比一个单原子大得多的距离。需要发展一种全部在量子水平下的建造和操作的新一代技术。超凡灵敏的测量本领、量子计算、量子密码术以及可控量子化

学也都可能出现。

新材料将被发展、了解和广泛运用到科学和技术上来。像高温超导材料和 FePt 纳米晶体这种新晶体结构的发现促进了一种新的理论解释,并得到了技术应用。下列一些课题和挑战也是显而易见的:对由越来越多元素组成的复合材料的合成、处理和了解;分子几何学以及仅仅考虑 1 维或 2 维空间运动的作用;现有技术中新材料和结构的关系;仿自聚生物过程的材料合成的新技术的发展;了解得很少的、从原子尺度直至宏观范围内影响物质性质的非平衡过程的各种控制(例如湍流、破裂和黏附)。

理论进步和大型计算机模型技术将使诸如星体爆炸死亡、地球磁场反转以及复杂物质的性质可以模拟复现并使其获得更深了解,而这在几年前还是达不到的。大型并行计算技术的迅速进步与同样令人惊叹的理论分析的发展相结合已经给了我们异乎寻常的能力,去模拟和预言复杂和非线性现象以及设想的具体结果。强核力、湍流以及在流体和等离子体中的非线性现象,宇宙中大尺度结构的起源,以及各种在凝聚态、核的、原子的和生物系统中的量子多体问题的挑战将变得容易处理。复杂体系的研究具有极广泛的意义:例如改进对于辐射传输的了解将可以使天体物理学和癌症的治疗均得到推动。

丰富的互动

理论和实验的结合可以对物质基本结构提供一种新的了解。基本粒子性质的奥秘在过去 10 年有了深化。极重的顶(Top)夸克已在 90 年代中期发现,太阳和上部大气层中微子振荡的连续观测为中微子具有微小质量提供了强有力的证据。在下一个 10 年中,新一代高能对撞机将揭示当今还不清楚的物理,即粒子质量的起源以及各种各样的其他粒子性质。这方面研究可以覆盖从新的惟一的基本粒子直到我们时空观的基本改变。

无论如何,这新物理是力图迈向历史目标的重要一步,这个历史目标就是发现一种可描述自然界所有基本作用力——强核力、电弱力和引力的统一理论。标准模型已经成功地将强力 and 电弱力统一了,但迄今引力尚未结合到统一的框架中。最有希望和激动人心的能把引力统一到其他力的一种概念性架构提出了这样的建议:在极小的距离下,基本粒子的行为不像一个点,而像弦和膜那样的高维表面。工作在这构架下的理论家在物理学和纯数学之间创造了新的和震撼人心的交叉点。

用来揭示星星、银河、暗物质和大爆炸的新仪器将以前所未有的翔实使我们对宇宙包括它的起源和命运的了解产生革命性的变化。现在宇宙本身就是一个基本物理研究的实验室,因为它的结构和进化依赖于占质量-能量 95% 的暗物质和暗能量的成分。连续测量可以检验宇宙学的基石并有助于决定暗物质和暗能量的性质。引力波可能被直接探测,而爱因斯坦的广义相对论关于黑洞的一些预言有望首次利用数据进行检验。化学元素的起源、极高能宇宙加速器的本质以及许多其他的难题将取得更深了解。寻求对宇宙的了解产生了物理学和天文学之间的丰富的新的互动。

在物理学和生物学之间也存在丰富的新的互动。所有基本生物力学最终依赖于分子之间的物理相互作用,所以物理学处在对许多生物学深入观察的心脏。现时的挑战包括成为神经、循环和呼吸系统基础的细胞活性的生物物理学,负责生物运动的运动肌的生物力学,DNA 和对细胞分裂以及细胞加工十分重要的酶的力学和电学性质等等。在不久的将来,由分子链折叠使蛋白质产生特殊生物性质的方式这类生物学中的最重要问题有望通过基本物理规律的分析来理解。在物理学中,特别对于在了解高复杂体系中发展的工具对于所有这些领域的进步是极端重要的。理论物理的方法同样也是重要的,并正在运用于生物信息学、生物化学和遗传网络以及大脑的计算的研究。

建议

PSOC 发表了 9 个建议,这是设计来加强整个物理学,并继续保证美国在国际上的领导地位。在这些建议中,其中 5 个要求由联邦政府、科学界、物理教育和国家安全方面的基础物理研究项目给以支持。这里引用并详细讨论 5 个主要建议,而以简略的方式介绍其余 4 个,这些建议的注意力放在物理学研究企业上面。

联邦政府必须为科学的基础研究担起首要责任。因为充满生命力的研究常常是面很宽,并远离能受到实际工业投资的商业发展。

基础物理学研究的结果带给技术和经济的成果现在比过去更快。10—20 年仍然是自一个十分重要的物理发现到它给社会带来影响的一个典型的时间间隔。激光、磁共振成像以及光纤传输线就是此断言的一些例子。驾驭今日许多高科技经济的技术正是从 1980 年代早期的物理学研究中产生的。

联邦对物理学研究的支持在 1990 年代以不变美元计算在下降。开始于 1980 年代中期的这种下降意味着: 在过去整个 20 年中年平均增长率仅为 2%。图 1 展示的是对物理的支持占国民经济(以 GDP 度量)的比例。联邦支持从 1980 年至今已下降了 20%。PSOC 认为, 这种下降使得联邦的科学基金会支持杰出的项目变得更困难了。进而, 这也使物理学领域对其所需要的高质量的专家的吸引力变弱了。当然, 联邦相对国民经济支持的下降也不是对所有学科: 图 1 展开了联邦政府对生命科学基础研究的支持在过去 20 年中比 GDP 增长要快。

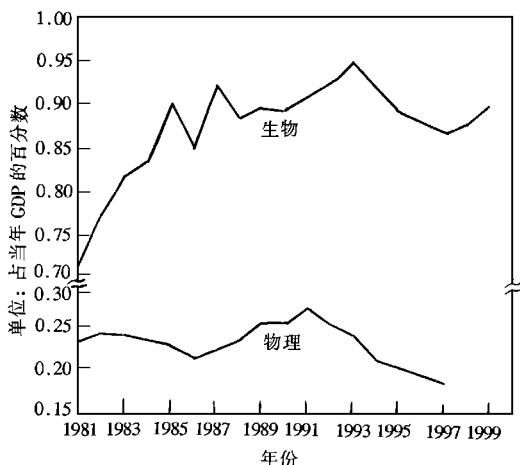


图 1 近 20 年来美国物理学科和生物学科获得的支持

建议 1

为了使物理学更强地贡献于国家所需要的领域, 联邦政府和物理学界应发展和贯彻一项长期投资于物理学基础研究的战略。这过程中考虑的关键点应包括: 对维持受物理学为基础的新技术驱动的经济强有力增长必要的投资总体水平; 强烈依赖于物理学进步的其他学科的需要; 物理学本身增长的科学机遇; 对研究项目稳定资助的成本效益; 基础研究投资和它产生有利影响之间的特征时间间隔; 不同基金来源的优点。物理审查评议委员会相信, 为了支持强有力的经济增长以及为生物医学科学在未来 10 年中提供基本工具和方法, 在基础物理学研究上相对于 GDP 的联邦投资应该恢复到 1980 年代初期的水平。

在我们中学和大学中物理学教育第一个基本的目标必须是大众的科学文化——一种广泛的基础物理原理的知识。另一重要目标是不断提供对物理学更广阔的理解力, 这一点对技术劳动大军来讲, 真是太重要了。再则, 必须培养学生对物理学具有浓厚

兴趣, 并使得有足够多的人吸引到科学生涯中来。PSOC 认为, 物理学教育在前面所提到的 3 个基本作用方面都是失败的。

建议 2

物理系应该检查并修订他们的课程以保证这些课程对于广大学生是实际的, 同时也应与其他科学和技术的重要领域相联系, 重新考虑的主要目标应该是: 1) 使物理学教育在大众的科学文化传播和训练技术劳动大军方面做得更好; 2) 通过想出更好的、外向的课程, 扭转美国学习物理的大学生和研究生人数的长期下降的状况。必须进一步改进从幼儿园到进入大学前(K-12)理科教师的配备。

物理系应该在培训理科教师方面起更活跃的作用, 系行政管理应为此给以足够的时间。

大物理、小物理

一项大的、多样化的、颇受支持的由个人研究者和小组承担的研究计划对于产生重要的技术进步以及物理学上的新思想是必不可少的。诸如核磁共振、激光、半导体和超导体正是出自于 1、2 个资深科学家带着几个学生工作的研究小组。为创造性和独立工作能力提供了许多机会的小组或单个研究者的研究环境最适合于学生的培养。在那种环境下研究生兴趣不断增长这个事实反映了许多物理系为复兴所做的努力。对单个研究者和小组研究工作的资助已处于严重的不当, 导致国家的一些重要机会的丧失。

建议 3

联邦科学基金会应该再次指定一种高优先级来对工作在削减边缘的物理学以及相关学科的小组和个人研究者提供充分和稳定的支持。

大型设备和众多合作者的协力合作对物理学中的许多最重要难题是必不可少的。但随着研究范围的增加, 严格评定科学机会和确定国家和国际优先级甚至更为重要。大规模的物理学研究项目需要开展广泛的 R&D, 并且联邦政府在专用设备开动之前必须做好支持该项工作的准备。一旦启动, 大规模的项目必须由对此负责的联邦基金会和有关的科学家仔细管理。这种机制必须得当, 使得那种项目一旦终止, 它们就不再是研究的最前线。

建议 4

规划和设置优先级对所有的物理都是重要的, 而对于需要大设备和大量合作者的项目就更显得更重要。为使这类工作成功, 美国 and 国外的物理界必

须发展一种分摊股份模式并清楚而有说服力的交流这种分摊。对最大型装置的规划和履行必须是国际化的。联邦政府应该为国际科学项目的美国参加者和领导发展一种包括加入和退出的明确标准在内的有效机制。

国家安全

国防部支持对国防利益有决定作用的物理学和其他科学的基础研究。尽管国防经费有增加,但国防部对物理学基础研究的支持相对于 1993 年不变价格计算下降了 10%。在过去的 10 年中,在 DOD 实验室里进行的物理研究无论在总量和质量上均出现实质性下滑,并发生相应的作为内部专家顾问服务的一批人才流失。这些实验室需要恢复,或者说这些专门知识的源泉必须得到发展。

能源部的国防项目国家实验室——阿拉莫斯,劳伦斯·利弗莫尔和三地阿(Sandia)已被国会委任来考证美国核武库的备用状态和可靠性。在无核试验情况下,这些实验室必须通过具有挑战性的部件实验和数值模拟来完成这一任务。这工作要求全体科学家,包括富有活力的物理学家核心,具有最高质量。

在这些实验室中,安全是必不可少的。它们必须能对发生的问题给出响应,并维持一个很好服务于富有创造力和科学上严密的环境。

建议 5

国会和能源部应该保证能源部国防计划办公室的国家实验室继续保持在科学上的优秀性,为此,需要重建对物理学家长线基础研究以及对实验室任务很重要的其他核心权限的高优先地位。

其他建议

PSOC 以另外 4 个附加的建议作为结束。首先,联邦政府、大学和它们的物理系以及有关工业部门应该发展伙伴关系。第二,联邦科学基金会应对核心物理学研究的广泛支持置以高优先级,并与在集中研究方向上的项目提供一种健康的平衡。第三,同等的评估应该坚持,评估结果应作为决定联邦经费如何授予的最重要因素。第四,应该由联邦政府和物理学界一起发展一种支持文献目录、实验数据库以及数据采集的协调途径。特别是,应该支持长期存放在洛斯阿拉莫斯国家实验室而新近转到康奈尔大学的文献目录档案。

进入新世纪的物理学面临许多机遇和挑战,同样经受了激烈竞争。为了继续保持其在科学技术上

的原创精神以及领导地位,美国科学家审察了世纪之交美国物理科学的研究和投入现状,对美国物理学进行了全面思索,挑选了 6 个优先研究领域,推荐了一些需要深入研究的科学课题以及应用前沿,阐述了物理学和其他学科之间的互动,为加强物理研究提出了 9 个建议,这些都讲得很中肯。此外,针对时弊,对如何加强物理学教学、强调个人和小组在科学研究中的重要作用(小物理)、加强对大物理的科学管理等方面,也提出了一些很有见地的观点和措施,这些都值得我们借鉴和参考。

* 美国物理学审察评议委员会成员简介

耶鲁大学, Thomas Appelquist, 委员会主席

亚里桑那大学, David Amert

波士顿大学, Andrew Cohen

威斯康星-麦迪逊大学, Susan N. Coppersmith

加州大学洛杉矶分校, Steven C. Cowley

哈佛大学, Peter Galison

加州大学圣巴巴拉分校, James B. Hartle

华盛顿大学, Wick Haxton

劳伦斯伯克莱国家实验室, Jay N. Max

贝尔实验室 Lucent 应用科学, Cherry F. Murray

索尔克生物研究所, Carl E. Stevens

贝尔实验室 Lucent 应用科学, J. Anthony Tyson

科罗拉多大学, Carl E. Wieman

Rensselaer 工业学院, Jack M. Wilson

NRC 物理学和天文学部主任, Donald c. Shapero

作者简介



董国梁, 1942 年生于上海, 1966 年于北京大学技术物理系毕业后一直在中国科学院高能物理研究所从事粒子物理研究, 除了国内的 BES 实验工作外, 还参加过 DESY 的 Mark J, CERN 的 L3、ATLAS 以及 KLOE 国际合作实

验, 多年来, 在多种学术刊物上发表论文 100 多篇。现为中国科学院高能物理研究所学术委员会委员、研究员、博士生导师, 并任中国高能物理学会理事, 《现代物理知识》副主编。