

实验空间化学——材料科学、场化学与空间化学的交叉

Experimental Space Chemistry——An Interdiscipline of Materials
Science, Field Chemistry and Space Chemistry

萧小月

(清华大学材料科学与工程系, 教授 北京 100084)

徐 燕

(清华大学化学系, 讲师 北京 100084)

空间化学, 又称天体化学, 作为当今空间科学和技术领域中的重大基础理论学科显得越来越突出和重要。空间化学以太阳系乃至星系物质为研究对象, 研究宇宙中各层次天体的化学组成、起源和化学演化, 以及宇宙演化对地球演化的作用和人类生存的影响及其影响的强度(欧阳自远,《天体化学》, 科学出版社, 1988年)。

发达国家利用其先进的科学技术和航天航空优势及实验条件积极拓展这一领域的研究, 每年为此投入大量的科研经费。以美国为例, 美国国家航空航天局(NASA)和国家自然科学基金是这一领域研究经费的主要来源。其研究成果作为美国最尖端高科技研究的基础被广泛应用于国防与空间技术领域。除此之外, 对其他学科的研究也产生着广泛的影响, 因为许多科学上重大发现的契机都蕴含在这一领域之中。因此, 在这一领域研究上的落后, 将会影响其他学科的发展水平, 尤其是国家综合科学技术水平的提高将受到局限。我国在这一领域的研究工作是从70年代开始的, 由于我国科学家们锲而不舍的努力和杰出的研究工作, 使我国在空间化学领域的研究得以在短时间内与发达国家并驾齐驱。

但是, 空间化学这门学科的发展与现代科学技术总体上的迅猛发展相比就显得滞重得多。就好象一条大河遇到了拦河大坝, 然而越过大坝之后必将会有一个新的突破和飞跃。因此, 积极推动空间化学这门学科进入一个新的研究阶段, 实现它与多学科及高科技领域的交叉, 并在我国国情允许的条件下建立起一个世界一流的新学科方向, 就显得非常必要和急迫。

一、问题的由来和实验空间化学的萌生

就目前国际研究水平而言, 空间化学这门年轻

学科由于受若干因素的影响而发展缓慢。这主要包括如下几个方面: (1) 空间化学依然处于取样(地球样品、陨石、月球样品和宇宙尘埃等)或观察(红外或射电望远镜等)→分析→归纳→分类→总结这样一个阶段。即处在一个观察和描述科学的阶段。因而它很难使我们对星系物质和各层次天体化学演化的动力学过程、热力学的非平衡过程, 以及宇宙空间复杂的物理场效应等对化学演化过程的影响有一个更深入的了解和认识。(2) 当今科学知识的迅猛膨胀使得科学家们的研究越来越专业化, 学科越分越细, 在某种程度上将学科之间有机的联系人为地切割开来。对于空间化学这门综合性如此强的重大基础理论学科而言, 它所面临的这一问题比任何其它学科都要严重。因此, 更加有意识地加强空间化学与其它新学科以及现代高科技的交叉研究, 形成新的学科交叉点, 已成为空间化学今后发展的方向。在发达国家, 这一发展趋势正在变得越来越明显。

很明显, 经典空间化学学科的发展主要是运用了现代分析手段。但是, 空间化学的研究不应该只是停留在取样分析和观察的阶段, 而应该向更深层次的研究推进, 即在实验室真实地模拟太阳系乃至星系物质的演化。现代场化学、材料科学和航天航空技术的发展为这一设想的实现提供了学科概念和实验基础。

科学的本质就是认识自然世界并使这些认识为人类服务。现代科学史表明, 当学科之间发生碰撞时, 就意味着学科研究将可能产生重大突破。这种突破不仅仅意味着基础理论研究的突破, 而且意味着对高新技术开拓和发展的巨大推动作用。

毫无疑问, 在经典空间化学的基础之上, 建立一门与场化学、材料科学、能源科学和空间科学以及相关高科技领域相交叉的实验空间化学, 或叫做

实验天体化学,已成为空间化学家们的当务之急。

何为实验空间化学?实验空间化学不仅仅采用现代分析方法,而更重要的是将现代各门分裂的学科和高技术熔于一炉,即将近年来迅速发展起来的场化学、材料科学和航天航空等高科技领域的新概念和新的合成方法引进空间化学的研究之中,使之有机地结合,在实验室模拟星际物质和各空间层次天体物质的化学反应和化学演化历程,并将之与天体物理学和地球物理学的观察数据以及地球化学和经典空间化学的分析结果相验证。同时,又将模拟实验的结果延伸到其它相关的学科,以带动和推进各相关学科以及高科技领域的发展。

首先,实验空间化学要与近十几年来迅速发展的场化学相结合。包括微波场化学、磁场化学、辐射场化学(如中子辐射, α 粒子辐射, γ 射线辐射等等)、超声波化学、微重力场化学等。其基本指导思想就是要在实验室真实地模拟和验证地球和其它天体物质在各种复杂的物理场中的化学演化过程(包括动力学过程以及各种热力学平衡及非平衡过程)以及各种场效应在化学反应中的作用。

第二,实验空间化学在实验方法上关键要引进材料科学中的化学气相沉积法(CVD),包括金属有机化学气相沉积、激光化学气相沉积、微波等离子体化学气相沉积,以及等离子体辅助化学气相沉积等。并借助航天航空技术建立微重力场实验。其基本指导思想就是模拟在各种条件下星际和天体物质的气—固相和液—固相化学反应,重复和验证太阳星云的演化历程,探讨天体演化和宇宙空间物理场对人类生存环境的影响,揭示生命起源的本质。

第三,实验空间化学借助于现代分析表征手段,如 SEM、HREM、XRD、EPMA、XPS、AES、FT-IR、ICP、MS-HPLC、GC 等等,对各类在不同条件下形成的各种化合物和矿物晶体的物理-化学性质进行测量与表征,并以此带动相关学科的发展,使之尽可能地为人所利用。

毫无疑问,实验空间化学作为一门新的交叉学科,它的萌生是基于坚实的基础之上的。首先,空间化学这门学科从 60 年代以来经过 30 余年的发展,特别是阿波罗宇宙飞船登月的成功和南极陨石的发现,已经逐步趋于成熟。它不断借鉴和引进新的分析方法,推动了学科的发展。另一方面,由于天文观测技术和航天航空技术的进步,空间化学的子学科星际分子学获得了迅速的发展。其次,近年来场化学的理论和实验方法得到迅速地发展。而材料科学的研究更是日新月异,新的实验方法如 CVD 技术已经成熟。同时,航天航空技术也在不断地完善和发展。这些理论、技术、实验方法和图书资料均可直接引用到实验空间化学中来。使空间化学的研究进入到一个新的阶段。

很明显,较之经典的天体化学而言,实验空间化学进入到一个新的定量的实验研究阶段,形成了与现代场化学、材料科学和航天航空等高科技领域的交叉。其强大的生命力、深远的理论意义和潜在的高科技应用前景,将随着学科的发展得到充分的证实!

二、展 望

空间化学的研究不仅仅聚焦在那似乎远离人类生活的深邃的宇宙空间。它与人类的生存和发展以及现代科学进步和技术革命紧密相连。其重要的理论意义可以从几位近年来荣获诺贝尔奖的科学家身上得到充分的体现:1967 年美国科学家贝特因提出恒星能源来自于热核反应的理论而获奖;1983 年美国科学家福勒因发展了宇宙中化学元素起源的理论而获奖等等。

同时,实验空间化学的研究不仅仅是一门重大基础理论学科因而带动相关学科向前发展,而且还是一门开拓性的应用基础学科。它与现代高科技领域的发展互为动因,相互促进。在 21 世纪的 6 大高科技领域中(生物技术、信息技术、新材料技术、新能源技术、新空间技术和新海洋技术),就有四个领域的发展与实验空间化学的发展密切相关,它们就是:新生物技术、新材料技术、新能源技术和新空间技术等四个领域。

下面将从可能的理论发现和应用价值简论实验空间化学的重大意义:

1. 理论意义

(1)在太阳星云演化研究中的意义。天体化学研究已经表明太阳星云演化的不均匀性,即难熔组份的形成和不均匀分布、同位素异常、微量元素和稀土元素的异常等等。这些特征是怎样形成的?是前太阳星云的残留物?还是超新星爆发的混入物?是太阳星云本身的选择性反应(如微波选择性偶合合成反应等)的产物?还是不均匀热源加热的结果?冷星云中的星际分子是怎样进行化学离解和合成的?是如何参与太阳星云的化学演化的?各种空间物理场在太阳星云的化学演化过程中又起着什么样的作用呢?等等。这许多的问题,在经典天体化学中难以获得满意的解释,而实验空间化学则可以通过各种实验模拟的方法去进行更加深入的研究,这对于太阳星云的演化等一系列重大理论都将会有重要的推动作用。

(2)在地球科学研究中的意义。人类赖以生息繁衍的地球,是暴露于太空中的一颗行星。人类一直对这颗行星倍加关注,并逐渐把对地球的认识演变成成为当今六大基础学科之一的地球科学。那么,实验空间化学能在地球科学的研究之中起到什么

样的独特作用呢? 实验空间化学最突出的特点就是可以在实验室模拟天体物质和天体物理场对地球的各种作用以及可能造成的灾变事件。半定量乃至定量地描述这种灾变事件的强度以及对人类生存的影响; 而另一重大课题则是探讨地球和月球的起源与太阳星云的起源和演化之间的内在关系, 及天体成矿的机理等等。

(3) 在生命科学中的意义。生命科学的基本问题就是化学反应、化学传质和能量转化的问题。其中生命起源的研究是人类面临的最前沿课题之一。关于生命的起源主要有两种学说, 一是地球起源说, 二是地外(即宇宙)起源说。实质上, 不管哪种学说, 研究生命起源的关键一环是简单分子怎样演化成高级生命分子? 问题在于各门学科在从事这一课题的研究时, 受学科思想的限制, 没有能从复杂的天体化学演化角度来考虑, 即各种场化学效应对这一化学转化过程的影响。实验空间化学正好弥补了这一空档, 架起了一座凌驾于学科之间的桥梁。例如实验空间化学将研究在各种极端物理-化学条件的影响下, 物质间的相互作用将会有何特殊性, 这些特殊过程对各种分子(包括生命物质)的形成是否会产生突变性的影响, 等等。这些深层次的实验研究, 势将对生命起源的研究带来突破性的进展。

(4) 对环境科学研究的推动作用。工业化社会的发展使得人类面临越来越严重的环境问题。人类赖以生存的空间环境是怎样受到宇宙物理场化学和污染物质的影响呢? 比如大气臭氧层的破坏机制是什么? 其中的光化学自由基反应过程是怎样进行的? 应该如何来防护? 实验空间化学正可以通过其独特的研究方法探讨空间化学过程中臭氧层的形成和破坏机制、自由基反应动力学、光化学反应机理等等, 为最终解决这一问题提供理论依据。

(5) 对化学研究的推动作用。星云中的化学演化向量子化学、分子束化学反应动力学提出了一大堆理论和实验难题。包括星云分子与尘埃粒子的气-固表面化学反应动力学、同位素的非平衡分馏过程、分子的光解离速率和不稳定分子的反应速率等等难以测量的参数。此外, 各种极端物理-化学条件下物质的存在状态以及其化学行为, 也是化学界非常关心的问题。通过实验空间化学的研究, 可望在此领域得出独一无二的成果。

(6) 对物理学研究的推动作用。通过在实验室模拟各种空间物理场对星云和天体物质化学演化的作用, 来反演各种空间物理场(如磁场、辐射场等等)的相互作用, 以及它们的强度随时间和空间的变化等。

2. 应用前景

(1) 与新材料技术的关系。实验空间化学不仅

仅将材料科学的最新研究成果及时地应用到空间科学之中来解决相关的学术问题, 而且能将自身的最新研究成果及时地反馈到材料科学之中以促进其发展。由于星系物质和各层次天体的化学反应过程是在极端条件(超高温、超高压、超高真空、微重力场、超强磁场以及超强辐射等等)下进行的, 因此一些特殊的化合物及矿物晶体得以形成。这就为高技术新材料的研究和开发展示了一幅令人神往的前景。最明显的例子就是继氧化物超导材料之后引起巨大轰动的 C_{60} 球全球研究浪潮。它是由空间化学家将获得的实验化学研究成果应用于实验化学之中, 与合成化学家共同努力而制备出来的。同时, 空间化学为在分子水平设计新材料开辟了一条道路, 比如分子簇材料等等。可以想象, 随着越来越多的新的星际分子及化合物的发现, 具有各种不同性能的新材料将会层出不穷, 并因此而刺激材料以及相关学科的迅猛发展。

(2) 与新能源技术的关系。能源诸如石油和天然气等等一直是地球科学研究的重点。但是, 由于地球能源短缺日益严重以及环境污染所带来的恶果, 开发空间能源如太阳能和其它辐射能, 已成为人类面临的重大课题。实验空间化学就是要将传统地球科学关注的能源延伸到宇宙空间, 为空间能源的综合利用和开发提供第一手的实验数据。空间能源的综合利用和开发关键在于了解能源的转化形式, 以及相关换能材料的运用。实验空间化学在这一领域中将发挥独特的优势。

(3) 与新空间技术的关系。空间技术的发展已成为一个国家综合实力的标志之一。交叉学科的目的就是不仅仅让空间技术为空间化学的深入研究提供一个更加广阔的实验场所, 而且要将实验空间化学的研究成果及时地反馈到空间技术领域, 为我国迅速发展的航天航空技术(比如空间实验站和登月计划等)和国防科学提供科学依据。各种物理场(磁场、重力场和各种辐射场等等)对天体物质包括宇宙空间飞行器产生化学效应的研究正是实验空间化学的研究范畴。对于我国空间化学家而言, 怎样将空间化学的研究与我国航天航空技术和国防科学技术结合起来, 并使之成为我国的航天航空技术服务, 正是我们面临的重大课题和义不容辞的责任。

三、对 策

作为一门新的交叉学科, 实验空间化学学科研究的开展势将带来一些突破性的科学研究成果和创新, 可以期望它必将对地球科学、空间科学和材料科学以及其它相关学科的发展起着前驱性的作用。

(下转第7页)

已变成世界范围的研究领域。该领域包含了各种数学、物理最基本性质的基础。而声学方法、技术在现代化社会中极广泛领域的应用,则要求对声波在不同介质和环境中传播非线性特性,以及由声波和介质的非线性相互作用而引起的各种效应做出完全透彻的解释。”这同时也指出了该学科今后的研究方向。

二、学科所面临的研究课题

非线性声学在水声和超声工程中得到应用已有多年,这方面已有不少论述和讨论。在此,就空气中非线性声学所面临的研究课题做一论述。

目前该研究领域主要有两大课题:

1、对现存的非线性声学理论加以创新、补充、完善,使之成为完整的理论体系。

该领域中还有若干理论问题没有解决。其中大振幅驻波理论尤为引人注目。非线性声学研究起始于大振幅声波。比较完整的无损媒质中的简单波传播理论在 1860 年左右就基本形成。20 世纪以来,耗散及频散等各种性质、效应也得到了充分研究。借助于伯吉斯(Burgers)方程对损耗介质中大振幅声波的详尽研究,行波理论已经成熟。但对于复合波情况,亦即大振幅声波在有界空间的性质的研究,由于缺乏强有力的数学工具及现代化的实验研究设备及手段,发展极为缓慢。尽管已有不少理论与实验研究论文,但相互之间常有相悖。理论研究没有突破性进展,实验研究也没有更大的创新。完整的理论体系始终没有建立起来。而在空气声中非线性声学的基础研究中,复合波理论更加重要,因为大多数高声强场产生于有界空间。此外还有声散射声、辐射压力等基础理论问题尚待解决。过去有些应用理论的提出主要是依赖大规模的、以实际应用为主的实验,微观理论模型正确与否并不清楚。这就需要运用现代化的实验研究手段对这些微观理论模型予以肯定或否定,使之构成完备的应用基础理论。

(上接第 14 页)

作为新学科发展的对策和长远规划,第一,必须积极加强相关学科之间的交叉,迅速在我国现有的科研条件下开展实验空间化学的研究;第二,国家科委、中国科学院及国家教委等相关科研单位的决策机构应对这一新的学科予以关心和支持,以期

2、发展技术应用与相应的物理分支结合,建立交叉学科的非线性新理论。

随着现代科学技术的新进展,各领域研究方向及范围不断加深扩大。对新的和比以前复杂得多的问题,只凭过去的经验和根据这些经验而作的猜测是不能解决的,必须从基本上对这些问题进行研究。开拓非线性声学新领域的必要性也就摆在了人们面前。如热声学是当今物理学界的研究热门之一。过去的热声转换,其声压级基本上处于线性声学范围内,而现今热声学的发展,已能使热声原动机内的声压振幅达到环境压强的 1~10%。这就需要创立非线性热声理论以解决高声级下热物理机制问题。1993 年在挪威的第十三届国际非线性声学会议上,许多研究论文也只是报导了新的实验现象和结果,而没有相应的理论予以解释。新现象、新问题需要新理论的提出。

三、学科研究的发展前景

非线性声学做为非线性科学一个不可缺少的组成部分。在物理学领域中占有特殊重要的地位。因此,重视和发展非线性声学的研究,是基础研究中一个具有战略性的问题。其发展前景涉及到现代国防、科研、航天航空及国民经济的重要领域。该学科在基础研究上的成果,将会促进其他学科,包括材料科学、能源经济、空间科学、医学等的大发展。空气声中非线性声学的研究,将为大功率超声应用、空气动力性噪声、声音的致命效应、声疲劳、燃烧不稳定性、热声致冷和热声发电、冲击波体外碎石、声悬浮和操纵、声发光、孤立子、混沌等高声强引起的效应和应用提供理论依据和研究手段。其产生的社会及经济效益将是不可估量的。非线性科学做为交叉学科,已被列入中国科学院 1995~2010 年的重点发展规划之内。可以预言,空气声中的非线性声学,在 21 世纪将继续蓬勃发展,成为一门颇有生命力的前沿学科。

(责任编辑 肖庆山)

在我国跨世纪的发展时期建立起一个世界影响的实验室,并以此作为争取诺贝尔奖的重要领域;第三,请求国家基金委等相关机构对这一新学科的发展予以扶植和支持,以争取我国在这一新学科中的有利地位。

(责任编辑 王宏章)