

## 从磁电统一到统一场论的发展\*

——纪念电流磁效应发现 160 周年

李国栋

(中国科学院物理研究所)

## 一、古代对磁和电的认识

人类对于磁和电现象的认识是很早的。在早期的人类活动中，就观察到高纬度地区的北极光，太阳表面上的黑子和大气中的雷鸣、电闪这类自然界的磁、电现象。虽然在很长的时期中，人们认识不到这些自然现象的磁和电的本质，但历史上留下来的丰富的记录却为研究地球和太阳活动以及古气候学等提供了宝贵资料。

我们祖国对于磁和电现象很早就有记载<sup>[1-3]</sup>。北极光是一种重要的地磁现象。据《史记·五帝本纪》记载，相传在黄帝时“见大电绕北斗枢星”。到秦汉时（公元前 221 年—公元 220 年），已有多次的确定年和月（日）的北极光记载，例如《史记·天官书》记载：“秦二世三年冬十月（公元前 207 年 11 月），……枉矢西流。”《汉书·武帝纪》记载：“（汉武帝）建元二年夏四月戊申（公元前 139 年 6 月 11 日），有如日夜出。”从传说的黄帝时代（约公元前 3—4 千年）到公元 16 世纪初，我国有约 420 余次的北极光记载。

太阳黑子是太阳的一种磁活动现象，早在两千多年前我国文献就有较系统的记载，例如《淮南子》中曾提到“日中有骏乌。”《汉书·五行志》记载：“汉元帝永光元年（公元前 43 年）四月，日中黑子，大如弹丸。”从公元前 1 世纪到公元 17 世纪，我国有 100 余次太阳黑子的记载。

我国还是最早发现和利用物质磁性的国家。远在春秋战国时期（公元前 770—前 221 年），《管子·地数篇》中已提到“慈（磁）石”，《吕氏春秋·精通篇》记载了“慈石召铁”，《韩非子·有度篇》提到了最早的指南器“司南”。《史记·扁鹊仓公传》记载西汉初“齐王侍医遂病，自炼五石服之。”磁石是五石之一，这可以说是最早的磁疗应用。到北宋年间（公元 960—1127 年），曾公亮等在《武经总要》（公元 1044 年）中记载了我国发明的“指南鱼”，沈括在《梦溪笔谈》（公元 1086 年）中记载了我国发明的指南针及地磁偏角的发现。不久朱彧在《萍州可谈》（公元 1119 年）记载：“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦观指南针。”这是世界上最早把指南针应用于航海的记载<sup>[4]</sup>。

雷电是自然界的电现象。我国远在殷商时代（约公元前 16—11 世纪）的甲骨文和西周时代（约公元前 11 世纪—前 771 年）的青铜器铭文（金文）中，就分别出现了“雷”字和“电”字。关于雷电的记载，也是较多的，例如《尚书·金縢》中有：“天大雷电以风”。《淮南子》中有：“阴阳相薄为雷，激扬为电。”沈括著的《梦溪笔谈》中有：“雷火自窗间出……其漆器银扣（镶嵌）者，银悉熔流在地，漆器曾不焦灼。有一宝刀，极坚钢，就刀室（鞘）中熔为流，而室（鞘）亦俨然……。”表明沈括已观察到了导体（银和刀）与绝缘体（漆和鞘）对雷电引起的效应是极不相同的。

\* 这是作者于 1980 年 10 月在全国自然科学史学术会议上的报告。

东汉时代(公元25—220年),王充在《论衡·乱龙篇》中曾提到“顿牟(琥珀或瑇瑁)缀芥,慈石引针。”顿牟缀芥是指绝缘体经摩擦带电后可吸引轻物,是一种静电现象;慈石引针则为静磁现象。当时将静电和静磁现象并列和比拟,是很有见地的。

在西方历史上,关于磁和电现象也有过类似的记载<sup>[5]</sup>。例如,在古希腊和罗马时代,亚里士多德(公元前384—前322年)和 Seneca(约公元前4年—公元65年)曾提到和记述过北极光, Theophrastus(公元前370—前290年)记述过太阳黑子, Thales(约公元前640—前547)记载过磁石吸铁和摩擦琥珀吸引轻物,希腊医生 C. H. Galen(约公元129—200年)曾用磁石治病。公元17世纪初,英国科学家 W. Gilbert(1544—1603<sup>[6]</sup>)在其所著《磁体(De Magnete)》(1600)一书中总结了当时及以前有关磁和电的知识;用实验证实地球为一大磁体;根据琥珀摩擦带电现象首创“电”字(源自希腊语“琥珀”)。英国物理学家 S. Gray(1670—1736)从静电实验中确定了导体和非导体的区别,提出了电的“二流体说”。美国科学家 B·富兰克林(1706—1790)从实践中证明雷电为一种电现象,并提出了电的“单流体说”。1785年法国物理学家 C·A·库伦(1736—1806)从实验中建立了静磁和静电作用定律。这些进展使静磁学和静电学由定性的观察和实验阶段进入到量化的研究阶段。

## 二、磁与电的联系和统一

在18世纪以前,磁与电的观察和研究是独立地发展的,没有发现磁与电之间的任何实质性的联系。虽然,王充很早就把“顿牟缀芥”的静电吸引和“磁石引针”的静磁吸引相提并论了, Gilbert 把磁和电的现象收集在同一书中,库伦更进一步得到了非常相似的静磁作用和静电作用定律,但因为都是仅限于静磁现象和静电现象的研究,磁与电的联系就不可能被发现。1792年意大利生物学家 L. Galvani 从蛙腿受

双金属环刺激产生痉挛的实验发现了动电(他当时称为“动物电”)现象。接着在1800年意大利物理学家 C. A. Volta 进一步从实验上确立了电流的理论,并研制成伏打电池。这才为磁与电联系的发现和研究创造了条件。

19世纪初丹麦物理学家 H·C·奥斯特相信自然界各种力(包括磁力和电力)是统一的,开始进行电对磁针影响的实验研究,他使用电池产生电流,由于电路开路或磁针位置不当,经过多次失败后,终于在1820年发现<sup>[6]</sup>“让导线水平放置在磁针上面,并平行于磁针时,磁针发生转动。”他做过多种的实验,曾用铂、金、银、黄铜、铁、铅、铋和汞作导线,通电流时都能使磁针偏转。又在导线与磁针间放置玻璃、木块、水、树脂和石头,都不影响磁针偏转。但用黄铜针、玻璃针和橡皮针代替磁针时,却不发生偏转。这样就确立了电流的磁效应,开创了把磁学和电学联系起来的“电磁学”。1980年正是发现这一重要的值得纪念的具有开创性意义的效应的160周年。

当奥斯的发现传到法国巴黎后,立刻引起了法国物理学界的轰动和兴趣,进行了电流和磁性之间关系的实验,发现了若干新的效应和定律。就在1820年中,首先是法国科学家 A·M·安培从实验中发现<sup>[7]</sup>两条载电流的平行导体间有力的作用,电流方向相同时为吸引力,电流方向相反时为排斥力(图1)。他还试验了两个圆形电流、电流和磁铁以及两个磁铁之间的相互作用。紧接着是法国物理学家 J·B·毕奥和 F·萨伐尔通过实验<sup>[8]</sup>(图2)确定了载电流的导线对磁针的作用力,其方向是既垂直于磁针对导线的垂线,又垂直于导线,其强度则与磁针和导线间距离成反比。这些都是构成安培定律和毕奥-萨伐尔定律的基础。在同一年内在同一科学领域中有这样多的新发现和新成就,在科学发展史上还是少见的。稍后,安培又从实验上证明通电流的螺线管相当于磁铁的作用,从载流导体的受力作用提出“电动力学”的

1) 略去“公元”和“年”,下同。

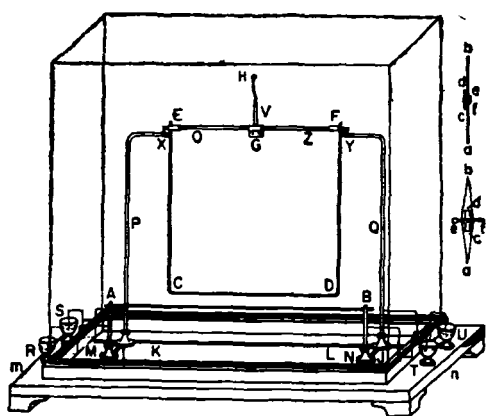


图1 安培关于载电流导体间受力作用的实验装置示意图<sup>[7]</sup>

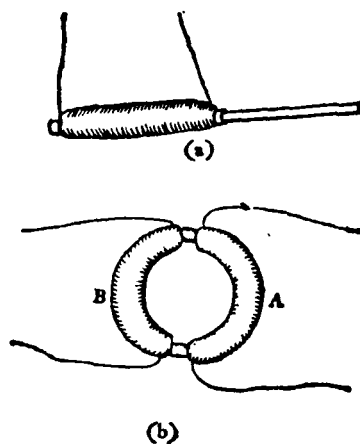


图3 法拉第关于电磁感应的实验示意图<sup>[10]</sup>

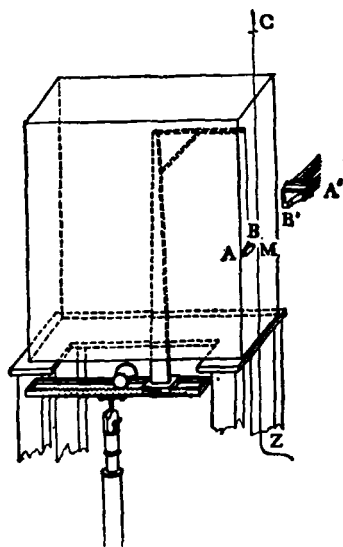


图2 毕奥-萨伐尔关于电流磁效应的实验装置示意图<sup>[8]</sup>

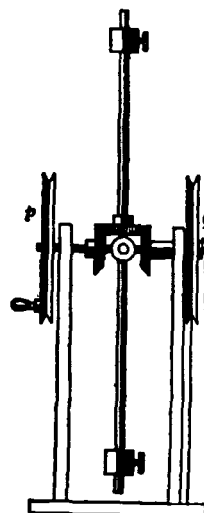


图4 麦克斯韦关于演示电磁感应的力学类比实验装置<sup>[11]</sup>

概念，对电和磁联系的进一步研究后摒弃了磁的二流体说，提出了对后来有很大影响的“磁的分子电流学说”，即“把磁铁看作是指向同一方向的、环绕着持续电流的粒子（集体）”<sup>[9]</sup>。1822年法国物理学家 D·F·J·Arago 发现通电流的线圈能使放在其中的铁磁化，由此制成了最早的电磁铁，进一步扩大了电与磁之间的联系。

从奥斯特的发现到 Arago 的工作，主要都是关于电流对磁的影响，即电流磁效应的研究。磁是否也能影响和产生电呢？出身贫苦和做过学徒的英国物理学家和化学家 M·法拉第 1831 年从实验中发现<sup>[9]</sup>，把磁铁插入或拔出铜线圈时，接在铜线圈两端的电流计会偏转(图 3(a))；

在环形铁心上绕两个线圈 A 和 B，当连接电池的线圈 A 接通或断开电流时，与线圈 B 连接的电流计也会偏转(图 3(b))。这就是有名的电磁感应现象，它证实了他的“电产生磁，磁产生电”的设想，并成为后来电力工业的基础。在法拉第几十年关于电磁学的实验研究中，是不断地有所发明和发现的。例如 1837 年发现了电介质对静电过程的影响，1845 年发现了光的偏振面在磁场中的旋转(Faraday 旋转效应)，是最早发现的磁光效应；同年又发现了绝大多数物质都具有抗磁性，奠定了物质磁性分类的基础；同年，他在题为“关于射线振动的思想”论文

中,提出“横向磁扰动的传播”概念,这是电磁现象与光相联系的有远见的见解;1852年在“论磁力物理线”的论文中,根据实验结果,提出了磁力线、磁场和电场的概念,认为磁、电作用的传递是借媒质(场)的作用,抛弃了传统的牛顿的超距作用概念。这种“物理场”的思想后来成为自然界各种力作用的基本思想,影响是巨大而深远的。

法拉第在电磁学方面的丰富的实验研究和精辟的物理设想<sup>[43]</sup>由英国物理学家 J·C·麦克斯韦进行了理论上的概括和总结(图4)。1855—1856年他对法拉第的力线概念加以严密的数学化;1862年在传导电流外引入位移电流概念,提出“交变电场产生交变磁场,交变磁场产生交变电场”,比法拉第的“电生磁,磁生电”的思想更为精确;1865年在其“电磁场的动力学理论”论文中,不但形成了统一磁和电现象的电磁场理论,而且提出了光也是电磁波,并从理论上推得电磁波的传播速度即为光的速度。经过近20年的广泛理论研究,1873年麦克斯韦完成了经典电磁学的里程碑著作《论电学和磁学》,确立了概括电磁场的基本方程,即麦克斯韦方程组<sup>[44]</sup>。

从奥斯特发现电流磁效应,开始研究磁和电的联系,到麦克斯韦建立电磁波理论,把磁、电和光现象统一为电磁相互作用,这半个世纪的发展不但是电磁学上一场深刻的革命,而且对于其后的电技术的兴起和统一场论思想的孕育都起了很大的作用。

1888年德国物理学家 H·R·赫兹从实验上发现了麦克斯韦所预言的电磁波,并证明它具有光波那样的反射、折射和偏振性质。这既是磁电统一的最有力的辉煌验证,也宣布了无线电电子学时代的开端。

### 三、磁与电的对称性问题

19世纪中后期电磁学的发展,完成了磁和电的统一,以麦克斯韦电磁场方程作为这一统一的完美的体现。20世纪初期原子物理学的

物理

兴起,一方面,揭示了物质的磁性和电性的微观本质,例如安培的磁分子电流模型获得了解释和改进;另一方面,也暴露出一些新的矛盾和问题,例如磁和电的对称性问题就是其中之一。从麦克斯韦电磁方程组:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho_e, \quad \operatorname{curl} \mathbf{B} - \partial \mathbf{E} / \partial t = \mathbf{j}_e, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \operatorname{curl} \mathbf{E} + \partial \mathbf{B} / \partial t = 0. \quad (2)$$

显然可看出,磁和电在方程中是不对称的。这是由于认为电的基本单元是电荷,正负电荷是可以分开的,因而有电荷密度  $\rho_0$  和电(荷)流密度  $\mathbf{j}_e$ , 但磁的基本单元是磁矩,因而没有磁荷密度  $\rho_m$  和磁(荷)流密度  $\mathbf{j}_m$ , 故(2)式右端为零。

自然界为什么只有电荷而没有磁荷呢? 实验中没有观测到磁荷, 究竟是因为自然界不存在磁荷还是因为没有具备观测磁荷的条件? 1931年英国物理学家 P·A·M·狄喇克从理论上指出<sup>[45]</sup>磁单极子(即磁荷)是可能存在的, 其物理根据是磁单极子的存在并不违反物理定律, 又可使麦克斯韦方程组对称化, 即(2)式变为

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \rho_m, \quad \operatorname{curl} \mathbf{E} + \partial \mathbf{B} / \partial t = -\mathbf{j}_m, \quad (3)$$

还可解释电荷的量子化。因为他推得基元磁荷  $g$  与基元电荷  $e$  的乘积为

$$g \cdot e = n \cdot \hbar c / 2, \quad (4)$$

式中  $h = 2\pi\hbar$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $n$  为正整数。根据磁单极子理论, 它具有这样一些特点:(1)总磁荷守恒, 正、负磁单极子将成对地产生或湮没;(2)基元磁荷比基元电荷大,  $g \approx n \cdot 137e$ , 磁单极子质量也比基元电荷(电子)质量大;(3)运动磁荷在电场中会受到磁洛伦兹力作用  $\mathbf{F}_{mL} = -\frac{g}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{E}]$ ;

(4)磁荷在磁场中受到磁力  $\mathbf{F}_m = g\mathbf{H}$ , 磁单极子在  $10^4$  奥磁场中每厘米获得约 200 兆电子伏的能量, 因此 25 米长的磁单极子加速器将相当于目前直径 2 公里的世界最大的质子加速器;(5)电离效应比电荷高  $(g/e)^2(v/c)^2$  倍;(6)磁单极子在介质中速度高于介质中光速时, 会发生 Cerenkov 辐射。磁单极子的这些特性揭示了观测它的条件和困

难。

从50年代以来,探索磁单极子的研究工作持续地开展起来,在实验方面<sup>[14]</sup>,主要从高能加速器、宇宙线、古老的岩石(图5)、陨石及月岩等寻找磁单极子,可说是“上穷碧落下黄泉”了,但都未得到肯定的结果,例如,加速器产生的磁单极子的产生截面上限估计约 $10^{-25}$ — $10^{-40}$ 厘米<sup>2</sup>,古岩石、陨石和月岩中的磁单极子上限约 $10^{-25}$ — $10^{-31}$ 个/核子。1975年 Price 等曾从高

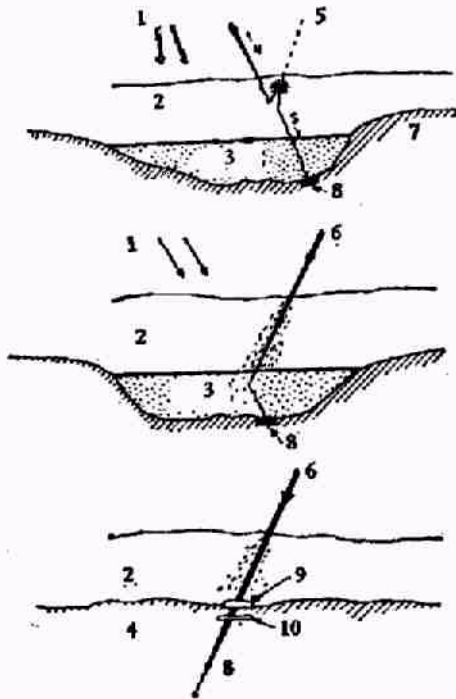


图5 磁单极子的产生和储藏示意图<sup>[14]</sup>

- 1. 地磁场方向; 2. 大气层; 3. 海洋; 4. 地壳;
- 5. 高能宇宙线; 6. 高能宇宙磁单极子; 7. 雨;
- 8. 俘获的磁单极子; 9. 黑曜石; 10. 云母

空气球的超重核研究装置乳胶、Lexan 叠片和 Cerenkov 膜(图6)中发现一件可解释为磁单极子存在的事例<sup>[15]</sup>,不久 Fleischer 等提出了不同的分析论断<sup>[16]</sup>,因而成为有争议的问题。在理论方面,近半个世纪来磁单极子问题的研究也有了许多改进和进展<sup>[17]</sup>。迄今尚未肯定地观测到磁单极子的原因,综合起来可能有下面几种情况:(1)磁单极子对束缚能太高,目前加速器能量尚不够使它们分离开;(2)自然界磁单极子丰度太稀少,发现的几率很小;(3)理论尚不完善,

因而实验方法和装置还有不恰当的地方;(4)自然界不存在磁单极子,即(4)式中  $n = 0$ 。

磁单极子虽然仍然是一个尚在探索和研究中的课题,但已成为一些物质结构模型(特别是基本粒子结构模型)的重要组成部分,例如,1969年 J. Schwinger 提出了双荷子(dyon)模型<sup>[18]</sup>,认为双荷子同时具有分数电荷和磁荷,是构成物质的基本粒子,用它可以解释基本粒子的分类,也可以解释弱作用下的 CP(电荷-宇称)不守恒问题。1972年 C. K. Chang 提出了电磁夸克模型<sup>[19]</sup>,假设电夸克具有分数电荷和分数重子数,自旋 = 1/2,为费米子;磁夸克具有分数磁荷和分数重子数,自旋 = 0,为玻色子。由电夸克和反磁夸克构成电磁夸克,由反电夸克和磁夸克构成反电磁夸克。这种夸克模型可以解决一般夸克模型的统计力学上的困难,也可以解释强子的磁矩。

总的说来,磁单极子理论虽然解释了磁和电的对称问题和其他一些问题,但到现在也仍然是一个正在探索和尚待实验和观测证实的问题。

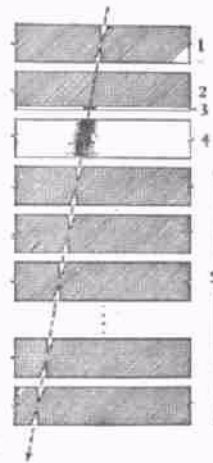


图6 Price 等探测到的一次磁单极子事件示意图<sup>[15]</sup>

- 1. Lexan 探测器;
  - 2. Cerenkov 辐射体 }  $v < 0.68c$ ,
  - 3. 快膜 } 或者  $Z \approx 80$ ,
  - 4. G-5 乳胶 } 或者  $g \approx 137e$ .
  - 5. 32层 Lexan 叠片探测器 }  $v \approx 0.5c$  朝下;
- 或者  $Z > 125, v > 0.92c$ ;  
或者  $g \approx 137e$ , 任何速度。  
故判定为向地球的磁单极子,  $g \approx 137e, v \approx 0.5c$

#### 四、从磁电统一到统一场论

用统一的观点来解释世界早已存在于古代的哲学和科学思想中。我国在商周之际的《易经》就用“阴阳”和“五行”来说明万物的本原和变化。到春秋战国时期《管子·水地篇》又提出了水是万物本原的学说。古希腊时代也先后出现过万物的本原是水(Thales)、气(Anaximander, 约公元前610—546年)或火(Heraclitos, 约公元前530—470年)的学说。德国哲学家康德在《宇宙发展史概论》中指出:“所有世界和世界系统都有同一个起源……有相应的结构和有规则的相互联系”。

磁和电的统一为近代自然界各种力(相互作用)的联系和统一的研究揭开了序幕。进入本世纪后,相对论的建立者爱因斯坦在其后半生中曾从事统一电磁力和引力的统一场论的研究,量子力学奠基人之一的海森堡也作过统一各种相互作用的尝试。自然界的四种基本力——电磁力、弱(作用)力、强(作用)力和引力,目前正处于逐步统一的研究和探索中。从表面看来,电磁力和引力是长程力,弱力和强力是短程力(力程 $<10^{-13}$ 厘米),它们的相对强度为1(强力), $10^{-2}$ (电磁力), $10^{-5}$ (弱力)和 $10^{-39}$ (引力),相差是极为悬殊的。怎样把这些作用对象、力程长短和强度大小都很不相同的力(相互作用)统一起来?它们相互间有什么本质上的联系?

在四种自然力中首先得到统一的是电磁力和弱力,合称为电-弱力或电-弱(相互)作用。1961—1968年S. Glashow, S. Weinberg和A. Salam先后从理论上证明,电磁力和弱力都可用满足 $SU(2) \cdot U(1)$ 对称性的规范理论统一地描述,遵从相同的定域规范变换,预言了中性弱流的存在,使中间玻色子获得质量,解释了弱力的短程作用<sup>[21]</sup>。1973年以后,从实验上发现中微子-质子散射中有中性弱流存在,高能电子-质子散射中出现不对称性,中微子-强子散射截面随能量增加而增大,这些都是与电-弱统一理

物理

论符合的<sup>[20]</sup>。

70年代初,在强作用的 $SU(3)$ 规范理论和量子色动力学(QCD)进展的基础上,出现了统一电磁作用、弱作用和强作用的“大统一”理论<sup>[21]</sup>,认为统一的电-弱-强作用在高能量下可以分成为满足 $SU(3)$ 对称性的强作用和满足 $SU(2) \cdot U(1)$ 对称性的电-弱作用,但在超高能(约 $10^{23}$ — $10^{25}$ 电子伏)下就合为一种满足 $SU(5)$ 对称性的统一的电-弱-强作用。这种“大统一”理论的主要结果是:(1)可导出电荷量子化,(2)由重子数和轻子数不守恒,预言质子会衰变(寿命约 $10^{30}$ — $10^{34}$ 年)。目前一些国家正在进行质子衰变的实验,这是检验电-弱-强统一理论的一个具有重要意义的关键性实验<sup>[22]</sup>。

关于进一步把引力作用包括在内的普遍统一理论也正在探索<sup>[23]</sup>。这就是引入费米子与玻色子变换(自旋 $s$ 变换 $\pm 1/2$ )的超对称规范理论,由此建立带有引力子(graviton)( $s = 2$ )和引力微子(gravitino)( $s = 3/2$ )的超引力理论。把这理论推广,通过一系列超对称运算和内禀对称运算,可以得到自旋从2到0的各种基本粒子,原则上可以把四种自然力统一起来,因此可称为电-弱-强-引力统一理论或普遍统一理论。不过这一理论还刚建立不久,很不成熟,许多问题都尚待解决,特别是缺乏理论所预言的实验验证。

三百年前牛顿统一了地球上物体运动和天体运行的规律,建立了万有引力理论,解释了宏观和宇观世界的力学运动现象;一个半世纪前,从奥斯特到麦克斯韦统一了磁和电现象,建立了电磁场理论;半个世纪前,在引力和电磁力之外又发现和研究了自然界的四种基本力(基本相互作用)中的弱力和强力,开始了深入探索微观世界和统一这些力的尝试。历史的进程表明,统一自然界各种力的研究,用统一的观点认识微观、宏观和宇观世界,是当代物理学中,也是当代自然科学中最富有挑战性的问题之一。

#### 参 考 文 献

[1] 李国栋,物理,3(1974),324. (下转第511页)