

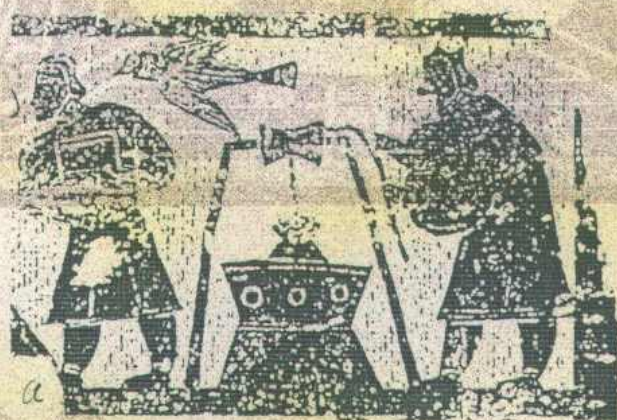


物理学 基础教程

A Course in Physics

(上册)

林清凉 戴念祖 编著



CHEP
高等教育出版社



Springer
施普林格出版社

PHYSICS

04
[62

物理学基础教程

(上册)

林清凉 戴念祖 编著



A0919250



CHEP
高等教育出版社



Springer
施普林格出版社

(京) 112 号

图书在版编目(CIP)数据

物理学基础教程(上册)/林清凉 戴念祖 编著. - 北京: 高等教育出版社;
海德堡: 施普林格出版社, 1999.10

ISBN 7-04-007950-X

I. 物… II. ①林… ②戴… III. 物理学 - 高等学校 - 教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 68084 号

物理学基础教程(上册)

林清凉 戴念祖 编著

出版发行 高等教育出版社 施普林格出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010 - 64054588

传 真 010 - 64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京民族印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16

版 次 1999 年 10 月第 1 版

印 张 22.75

印 次 1999 年 10 月第 1 次印刷

字 数 580 000

定 价 30.00 元

© China Higher Education Press Beijing and Springer-Verlag Heidelberg 1999

版权所有 侵权必究

第一章

绪 论

(I)什么是物理学?

物理学是自然科学的一个基础门类。简单地说,它是研究物质结构和物质运动规律的学科。通过观察、实验和理性的探索,揭示各种复杂自然现象的本质及其相互规律,通过数学手段、简单明了地表述它们所遵从的原理或定律。

“物理学”一词源于希腊文 $\Phi\upsilon\sigma\iota\kappa\eta$, 该词本意是探讨自然界和自然现象。古希腊学者 Aristoteles 创造了这一词并用它作为他的一本著作题名,其意思为《自然哲学》或《自然论》(中译本多为《形而上学》)。该书的中世纪拉丁文译本题为 *Physica*。由此产生了 *Physics*(物理学)一词。Aristoteles 本人对物理现象的研究并不足取。但他创造的这一词却有深远影响,以致经典物理学最伟大的奠基人之一 Newton 将自己划时代的著作题为 *PHILOSOPHIAE NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA*, 也即 *Mathematical Principles of Natural Philosophy*。

一般地说,按照所研究对象的运动形态将物理学分为许多门类。研究物体的机械运动与其相互作用为主的,称为力学。因为它以 Newton 三大运动定律和万有引力定律为基础,故又称为经典力学或 Newton 力学。其中,以流体(液体和气体的总称)为主要对象的,称为流体力学;若仅以材料及其某些物理特性(如弯曲、断裂和弹性等)为主,就称为弹性力学;或则仅仅研究机械运动中的振动形态及其在空间中的传播现象,它既属于力学范畴,又是声学的基础。但在当代科学中,声学已发展成一门独立的学科。以研究热现象为主的称为热学。若考虑一般热系统而不追究微观成份的运动细节,则称为热力学;深入研究热现象本质、研究大量分子组成的宏观物体的热性质和行为的统计规律,就形成了统计力学。后者不涉及某个分子在某时刻的状态,而是以统计系统的方法研究大量分子的平均行为或概率。研究电和磁的关系和带电粒子间的相互作用称为电磁学。由电、磁或带电粒子作用所及(所影响)的空间称为电磁场,而电磁交互作用是通过场的传递能量方式传播,所以又叫电磁波。光是可见的电磁辐射,是电磁波频谱范围内一小部分,因此,光学可以看作是电磁学的一部分。将光学分为几何光学和物理光学只是研究范畴的区分:前者研究光的传播,如反射、折射等,但它是一切光学仪器的设计基础;后者研究光的本性以及光和物质的相互作用。

以上各学科在 1900 年以前已发展到充分完备的形式,而且都适用于宏观世界和运动速度远小于光速的物理现象。人们统称它们为经典物理学。

随着物理学本身的发展,从 20 世纪初开始,又诞生了许多新物理学分支学科。例如,原子物理学,研究原子结构及其运动、变化的规律。各种元素的原子辐射都具有特征光谱,通过原子光谱研究其结构是初期原子物理学的重要手段;原子核物理学是研究核结构及其力学等问题。核裂变和聚变是物理学家曾经最感兴趣的课题。粒子物理学,是研究基本粒子包括寿命极短(10^{-25} 秒级)的共振态的种类、分合变化及其性质等。经典力学和经典电磁学无法解决这些新分支学科的问题,只有通过量子力学和相对论力学才能较正确理解它们的本质。

量子力学是研究微观世界的基础理论。微观世界的基本特性是波粒二象性,描述这种物理状态一般地使用复函数,其动力学量由算符表示,在这里所能得到的是统计规律。量子力学的最大特点是物理量值的不连续性和内禀(intrinsic)不确定性。这与经典力学取连续变化的实数值和因果联系的物理量是根本不同的。相对论力学是研究接近光速运动的高速物体的现象。它包括狭义相对论(special theory of relativity)和广义相对论(general theory of relativity)。狭义相对论提出了一种新的时空观。在相对性原理(the principle of relativity)和

光速不变原理两个基本假设下,得到时空是密切相关的结论。也就是说,它获得了经典力学无法理解的诸如空间收缩、时间膨胀,同时性的相对性、质能关系、以及光速是一切粒子的速度上限等结论。广义相对论把描述运动的参照系从惯性系推广到加速系统中,以等效原理为基础,将引力现象几何化并把它纳入时-空结构中。简言之,将引力现象看作是时-空弯曲的表现,从而导出了一些重要结论。

量子力学和相对论是近代物理学的两大理论基础。近代物理学以研究微观、介观世界,运动速度接近光速的物理现象为主要内容。除上述之外,近代物理学还包括量子场论、固态物理、磁性、半导体、超导、高分子物理、凝聚态物理(condensed matter physics)、等离子体物理(plasma,又称为“电浆物理”)、生物物理等等。

经典物理与近代物理之间并不存在一条不可逾越的鸿沟。相对论力学所以比牛顿力学深入,是因为它不仅能解释 Newton 力学所能解释的现象,而且能解释 Newton 力学所不能解释的许多新发现和新现象;它作出了在 Newton 力学看来是根本不可能的一些科学预言,并且得到天文观察或实验的证实。另一方面,仅在低速运动的物理世界中,经典力学仍然是极好的描述物理现象的科学;当物体的速度远小于光速时,狭义相对论力学定律趋近于经典力学定律。在引力较强大、空-时弯曲结构较大的情况下,经典力学失去效用,而广义相对论发挥威力;相反,在引力不强、空-时弯曲极小的情况下,广义相对论的预言就与 Newton 运动定律和万有引力定律的预言趋于一致。

(II) 物理学的历史进程

为使读者对本书涉及的内容有个历史轮廓,我们在这里简单地叙述一些物理学史,特别是经典物理学的历史。

(A) 古代和中世纪的物理学

大约在公元前 4000 年到前 2000 年间,在底格里斯河、幼发拉底河流域、尼罗河流域、印度河流域和黄河流域,逐渐形成了古代文明的中心。公元前 7 世纪到公元前 2 世纪,相当于中国的春秋初期到汉代,古代科学在古希腊和中国分别发展到顶峰。鉴于中国的历史进程与科学发展情况,我们在以下单独叙述物理学在中国的发展史。

古希腊和古罗马的物理学实际上最好的是静力学。其真正的代表人物是 Archimedes (287 - 112 B.C.)。他建立了杠杆定律、浮体定律,发明了 Archimedes 螺旋。更重要的是,他将 Euclid(约 330 - 275 B.C.)几何学和逻辑学推理用于解决物理问题。这为后来物理学的发展在方法上提供了一个榜样。至于 Aristoteles(384 - 322 B.C.)的物理学,实质上绝大部分是由错误、逻辑加诡辩集合而成的几个概念。例如,他将运动分为“合乎自然的运动”和“违反自然的运动”;提出“两个体积相等的物体,较重者下落较快”;箭矢所以在空中飞行是由于持续不断的“接触力”和“自然界害怕真空”所致。对于后者,他论证说:飞行中的箭在其尾部产生了真空;自然界不允许真空存在,因此,箭周围的空气涌向箭尾推动箭向前运动。在今天看来,奇怪的是,占有整个中世纪的形而上学,不是 Archimedes 的物理学,而是 Aristoteles 的物理学。这大概与 Aristoteles 论证问题的巧妙方式有关。

中世纪黑暗时期,古希腊和罗马衰落。他们的大量经典传进阿拉伯国家,并被译成阿拉伯文而保存下来。但在物理学方面,只有光学在阿拉伯得到发展。这个时期相当于中国的唐代和宋初。Al Hazen(965 - 1038)发展了 Plato(427 - 347 B.C.), Euclid 和 C.Ptolemy(约 90

- 108)的光反射和折射知识,并对眼睛的构造作出解剖研究,创立了至今沿用的一些术语,如“角膜”、“玻璃液”等。

欧洲中世纪是教会统治一切的时代。Ptolemy的地心天动说,被公认为不可动摇的神学教条,“科学”讨论局限于诸如在一个针尖上有多少天使在跳舞、上帝能否造出他自己也举不起来的石头。任何背离宗教信仰的思想都将受到宗教裁判所的严厉镇压。另一方面,在这时建立了许多附属教堂的学校,以1100年创建巴黎大学为标志,其后,波洛尼亚大学、牛津大学、剑桥大学相继建立并成为学术活动中心。这些学校虽只有讲授从阿拉伯文译成的Aristoteles著作,但是,Aristoteles讨论问题的逻辑方式成了欧洲的传统,无形之中一代代地培养了学生逻辑思维的习惯。18世纪来临之际,这个方法就自然而然地被学者采纳为探讨自然界的方法。

中世纪后期,即13和14世纪期间,欧洲一些学者,如William of Ockham(1285-1349), Jean Buridan(1300-1358), Albert of Saxony(1316-1390)和Nicolas Oresme(1320-1382),在评注Aristoteles著作的运动观念中,针对后者必须由接触持续推动的理论,提出并发展了“冲力说”(theory of impetus)。这个学派虽然在阐述自然方面理论含混、概念不清,但对后来运动学和动力学的建立起了一定作用。

(B)经典物理学的创立

近代自然科学是文艺复兴的产物。古希腊和罗马的大批文献,如Euclid的《几何原理》等,被译成拉丁文,从而激起人文主义的产生,激起新兴市民去探讨现实世界和自然界。这个时候,无论是西方还是东方,一方面积累了大量的由工艺传统而获得的科学知识;一方面诸如纺织、钟表、眼镜与玻璃等生产技术的进步,为科学研究提供了新的实验手段。近代科学正是产生于这种背景下的16,17世纪。1543年,波兰天文学家N. Copernicus(1473-1543)发表《天体运行论》,提出日心地动说(地球沿圆轨道运动),从而和经院哲学的教条即Ptolemy地心说发生冲突。之后,Galileo Galilei(1564-1642)携望远镜进行天文观察和一系列关于运动物体的实验。这不仅推翻了Aristoteles为代表的经院哲学的运动观,并且以精密数学形式建立了诸如惯性定律和自由落体定律,创立了加速度概念。其后,经过J. Kepler(1571-1630), C. Huygens(1629-1695),以及稍早时候Simen Stevin(1548-1620)等一批人的努力,终于以I. Newton(1642-1727)为代表建立了经典力学体系。其中,Newton三大运动定律和万有引力定律是这个体系的核心。它们将过去一向认为毫不相干的地上物体(即所谓“世俗”的)运动规律和天体(属于神圣的“天堂”)运动规律概括在一个严密的统一理论之中。这是人类认识自然的历史中第一次理论的大综合。

尚需指出,Newton特别重视数学的应用,他和G. W. F. Leibniz(1646-1716)各自独立地发明了微积分。在实验基础上,Newton充分运用数学形式描述和论证自然现象的因果关系,充分运用逻辑推理的分析、综合法。他的方法成为此后物理学最重要、最基本的方法,也成为自然科学各门学科的楷模。

作为经典力学的另一个发展序列是由E. Torricelli(1608-1647), B. Pascal(1623-1662), Otto von Guericke(1602-1686)等人的工作组成的,并导致1662年R. Boyle(1627-1691)和E. Mariotte(1620-1684),各自独立地建立了关于气压和体积关系的定律。

从18世纪起,另有一批人从另一角度构筑经典力学。人们称它为分析力学或解析力学。D. Bernoulli(1700-1782), L. Euler(1707-1783)研究了多质点体系、刚体和流体动力学。J. L. d' Alembert(1717-1783)作出了以他的名字命名的用于代替运动方程的原理, J. L. Lagrange(1736-1813)建立的微分方程对于复杂情况特别适合的形式。此外,还有

L. Poinsot(1777 - 1859), G. G. Coriolis(1792 - 1843)以及 A. L. Cauchy(1789 - 1857)等人的工作。后者在 R. Hooke(1635 - 1703)工作的基础上给弹性形变与形变作出了普适的数学表述,总结了变形力学的最终形式。最后, W. R. Hamilton(1805 - 1865)发展了 Lagrange 的微分方程,提出了最小作用原理。该原理后来被应用于一系列非力学过程中,并被认为是所有自然规律中最概括的一个。K. G. J. Jacobi(1804 - 1851)提出了用于多体系的 Hamilton-Jacobi 微分方程。迄今为止,从质点到连续体所有力学问题都已得到解决。原则上,经典力学达到了尽善尽美的地步。

19 世纪物理学在以下几个方面获得了长足进步。

在 17, 18 世纪各种温度计的制造和温标的选定过程中,有两个定律曾推动热力学的发展。一是前述 Boyle 定律,一是 1802 年 J. L. Gay-Lussac(1778 - 1850)对理想气体膨胀的测定。后者指出,在一定体积下气体的温度与压强变化比例为 $1/273$ 。这是热力学的重要概念“绝对零度”的先导思想。

起初,人们相信热是一种类似流体的物质。苏格兰的 Joseph Black(1728 - 1799)虽持此观点,但他不仅是“潜热”概念的提出者,而且最早(1760 年)将热量与温度从概念上区分开。B. Thompson(即 Graf Rumford, 1753 - 1814)于 1799 年首先从钻炮眼的机械运动中发现热是一种运动。热是一种能量,能量守恒以及各种形式的能量可以相互转换的定律在 19 世纪 30 - 40 年代由十余位科学家从蒸汽机的效率、机械、电、化学、人的新陈代谢等不同侧面作出了独立的研究。这其中有 1842 年 J. R. von Mayer(1814 - 1878), 1843 年 J. P. Joule(1818 - 1889), 1847 年 H. von Helmholtz(1821 - 1894)的工作。特别是 Joule 测定了热功当量。Helmholtz 充分发展了能量守恒原理的普遍意义,而 Lord Kelvin(即 William Thomson, 1824 - 1907)于 1853 年对此作出最后定义。约 1860 年能量守恒原理得到普遍承认,很快它就成为全部自然科学和技术科学的基石。它所揭示的热、机械、电、化学等各种运动形式之间的统一性,从而达到物理学的第二次大综合。受这一思想的影响,动力学量的守恒说纷纷被提出,如动量守恒、角动量守恒、动量矩守恒,等等。

能量守恒定律又称热力学第一定律。它同时判决永动机是不可能的。在 Sadi Carnot(1796 - 1832)对蒸汽机的热功转换进行研究的基础上, R. E. Clausius(1822 - 1888)和 Kelvin 分别在 1850 年和 1851 年为第二定律的建立开辟了道路。第二定律基本解释了第二种永动机是不可能的,即建造一个把热转化为机械功而不产生任何其他影响的机器是不可能的。第二定律由许多表达形式。1865 年, Clausius 给第二定律引入了一个非常重要的新的态函数,称为熵,用它表示一个物理系统的秩序程度(又称混乱程度)。并指出,一个孤立系统的熵总是趋向增加的方向而变化。熵的概念和第二定律的建立,立即在化学、天文学,以及一切和热现象有关的科学门类中起了不可轻视的作用。1906 年, Walter Nernst(1864 - 1941)提出了热力学第三定律。

随着热力学的建立与发展,分子运动论和热现象的统计方法也建立起来了。起初, D. Bernoulli(1700 - 1782)曾提出气体运动论,但已被人忘却。化学家创立了现代原子、分子概念, J. Dalton(1766 - 1844)定义原子量, A. Avogadro(1776 - 1856)提出了后来以他的名字命名的常数。在设想气体分子为刚性球粒子时, 1856 年 K. A. Krönig(1822 - 1879), 1857 年 Clausius 各自提出分子在短瞬间作直线运动的观念。1858 年, Clausius 又提出了重要的平均自由程概念,证明气体分子碰撞过程的特点。1860 年 J. C. Maxwell(1831 - 1879)测得平均自由程长度值,并建立了速度分布定律。根据这些知识, Joseph Loschmidt(1821 - 1895)以数学计算获得了气体分子半径和一克分子的分子数的准确数量级,后者称之为 **Loschmidt 数**。尤其是, Maxwell, L. Boltzmann(1844 - 1906)和 J. W. Gibbs(1839 - 1903)的工作,发展了分子运

动论并为统计物理学奠定了基础。一个新的区别于 Newton 以来的物理观念在物理学中出现了。这就是统计物理不是研究单个质点的运动状态,而是研究一大群分子的运动状态,“几率”(概率)的概念被引进物理学之中。统计力学可以处理分子运动论的所有问题,而且,更容易地导出能量均分定律和由 P. T. Dulong(1785 - 1838)与 A. T. Petit(1791 - 1820)在 1820 年获得的定律,即克原子比热为 6 卡/度。1887 年, Boltzmann 在熵和几率之间架起了数学桥梁:熵(S)和状态几率(W)的对数成正比($S = k \log W$),其比例因子 k 即是 Boltzmann 普适常数。热力学第二定律表述的熵增加意味着向更多的几率状态的过渡。同时,发现了分子运动的微小涨落现象。这个重要的事实,即涨落说,为 1827 年植物学家 Robert Brown(1773 - 1858)发现的悬浮粒子的运动(也称 **Brown 运动**)是纯粹热现象作出了最好的说明。这门学科的发展到此并未终结,直到 20 世纪 40 年代一直不断有新发现。

比起经典力学来,电和磁是一门古老而又晚起的学科。古代中国人对此作出一定的贡献。但是,从 1600 年 W. Gilbert(1540 - 1603)的《论磁》问世,到 18 世纪初,研究者面临摩擦电、电火花的形成和大气潮湿的影响等一些错综复杂的现象,进展极为迟缓。其中,较为重要的事件有:荷兰莱顿的 P. van Musschenbroek(1692 - 1761)于 1745 年发明莱顿瓶;美国 B. Franklin(1706 - 1790)于 1749 年以风筝实验证明天空闪电和摩擦电的一致性,结束了古代人关于这两种电(前者属于天上的神,后者属于地上的俗人)是各自独立的认识;A. G. Volta(1745 - 1827)在 1775 年描述了起电盘,后来发展为感应起电机。直到 1785 年, A. C. Coulomb(1736 - 1806)发明扭秤,才使他自己和 Henry Cavendish(1731 - 1810)各自独立地发现两电荷之间的作用力定律,今称为 **Coulomb 定律**。由此,又引起了一系列进展,如 1786 年 Coulomb 发现导体对其内的磁屏蔽现象;S. D. Poisson(1781 - 1840)于 1811 年将引力现象的“势”概念引进电学之中;加之,1782 年 P. S. M. Laplace(1749 - 1827)对引力势坐标函数导出偏微分方程($\Delta\phi = 0$),1812 年 Poisson 将它修改为适用于物质内部,使该方程式既是 Newton 引力理论的概括总结,也为静电势理论奠定基础。这样,静电学理论基本达到一个完善阶段。其中,电荷守恒定律是在 1843 年由 Faraday 实验证实的。

电磁发展史上的一个重大转折是由 L. Galvani(1737 - 1798)和 Volta 作出来的。Galvani 于 1792 年报告了他关于蛙腿痉挛的实验观察,Volta 立即将此观察变成一个物理发现,于 1800 年制成 Galvani 电堆,从而打开了一个完全预想不到的新领域。电池发明的先头影响是关于电解的研究。虽然在此前,即 1797 年 A. von Humboldt(1769 - 1859), J. W. Ritter(1776 - 1810)等人发现电路中电解现象,但还是在电堆制成后,才使 Humphrey Davy(1778 - 1829)关于电解的一系列研究成为方便、可能。1834 年 Faraday 建立了电化学当量定律,其他一些人还进行了关于各种离子迁移的一系列研究。1889 年, W. Nernst(1864 - 1941)以电动势理论将它们作出有价值的总结,完成了 Galvani 电流所以产生的理论。而首先冲入这个预想不到的新领域的是 H. C. Oersted(1777 - 1851),他于 1820 年在一个偶然机会中发现电流的磁效应(电流使磁针偏转)。基于这一发现的理论意义,即它表明原先独立的电和磁可能有统一的趋势,也因为电的技术应用前景,因此,一大批物理学家,特别是法国物理学家立即涌入这一新领域,在两年的时间内就奠定了电磁学的基础。这两年的主要成就有: D. F. Arago(1786 - 1853)和 J. L. Gay-Lussac(1778 - 1850)观察到铁片被电流磁化; A. M. Ampère(1775 - 1836)发现同方向电流彼此吸引,反方向的电流彼此相斥,并提出了电使磁偏转的方向法则。他还创立了“电动力学”一词。J. B. Biot(1774 - 1862)和 Felix Savat(1791 - 1841)同时表述了单一电流线元的磁作用定律。稍晚几年,即 1826 年, G. S. Ohm(1787 - 1854)建立了电阻定律,清楚区分电动势、电势梯度、电流强度的概念,并为导电率概念打下基础。顺便说一下,解决分支电流问题的 Kirchhoff 法则是在 Ohm 工作基础上于 1847 年由 G. R. Kirchhoff(1824 - 1887)建立

的。

电流的磁效应的发现促使 Faraday 作了一系列有关的实验研究。1831 年,他终于发现了电磁感应定律:磁体与导线之间的相对运动,导线中有电流产生。1833 年,H. F. E. Lenz(1804 - 1865)对这感应电流的方向提出了有关法则。Faraday 的发现是发电机的理论基础。虽然他的发现到发电机的真正建造经历了 35 年之久,但他的实验为人类开辟了一种新能源,打开了电力时代的大门。为了解释他的实验, Faraday 提出了“力线”的概念。在引力超距作用的时期,他的思想受到许多异议。当时尚年轻的 Maxwell 却能透彻了解其中的意义,并致力于为 Faraday 的发现提供数学基础。Maxwell 分别在 1856 年和 1862 年发表二篇论文,把全部电磁现象归结为一组迄今闻名的矢量微分方程,引进了“位移电流”,从方程中导出电磁波的存在以及电磁波以光速传播的结论。Faraday 和 Maxwell 等人的工作导致物理学史上第三次大综合,揭示了光、电、磁三种现象的本质统一性。1888 年,H. R. Hertz(1857 - 1894)以实验证实了电磁波的存在,并证明了它具有光的一切特性。电磁波的发现,预示了无线电通讯和稍后兴起的电视技术的到来,为现代人类的物质文明奠定了强力基础理论。至此,电磁学的理论基础大致上全部完成了。当然,它还应包括 1884 年 J. H. Poynting(1852 - 1914)的能流理论,1900 年 H. A. Lorentz(1853 - 1928)和 H. Poincaré(1854 - 1912)关于电磁冲量的知识,以及 1890 年 Hertz 和 O. Heaviside(1850 - 1925)改写 Maxwell 方程组(即今日教学上通用的写法),使它以对偶形式出现,从而赋予 Maxwell 方程组美学上真正完美的形式。

Maxwell 的电磁理论已将光的本性揭示清楚,我们尚需对此前光的历史作一简要说明。

光的反射和反射定律为古代人所知晓; W. Snell(1580 - 1626)在 1621 年、R. Descartes(1596 - 1650)在 1637 年各自从实验中推导出折射定律。这两个定律虽然奠定了几何光学的基础,但进一步发展还待时日。因为一时无法确定光密介质与光疏介质中哪个光速更大或折射率更大。这引起了许多数学家和仪器制造师都参与这一物理问题的研究。1850 年, J. B. L. Foucault(1819 - 1868)和 A. H. L. Fizeau(1819 - 1896)根据 D. F. J. Arago(1786 - 1853)的建议,测得水中光速小于空气中光速,才宣告这个问题的基本结束。自然,光在空间的传播速度是由 O. C. Römer(1644 - 1710)于 1676 年通过观测木卫的蚀而测定的。1729 年, J. Bradley(1693 - 1762)发现光行差,才真正结束了光是瞬时传播还是有限速度的争论。光行差的发现也为地动说提供了第一个确凿无疑的直接证据。

光学发展初期,对颜色的解释争论颇大,而且还影响到望远镜的设计制造。Newton 于 1672 年以棱镜实验证明白光是由各种色光组成的。为了避免色差,他于 1668 年设计了反射望远镜。1753 年, J. Dollond(1706 - 1761)成功制造了消色差折射望远镜。反对 Newton 颜色学说的是德国著名诗人 J. W. von Goethe(1749 - 1832)。后来关于颜色学的进展涉及人眼的生理与心理感觉等问题,本文不赘述。1675 年,Newton 又发现薄膜干涉,即所谓 Newton 环现象(Boyle 作出类似发现,但他未曾认识到颜色与薄膜厚度之间的关系)。加之,早在 1665 年, F. M. Grimaldi(1618 - 1663)曾描述杆和光栅的衍射现象。这样,干涉、衍射和偏振等发现与光的本性问题的讨论结合在一起,光学成为长时期持有争论的学科。

起初,为了解释上述现象,Newton, R. Descartes(1596 - 1650)持射流说,或简称微粒说;而 R. Hooke(1635 - 1703), C. Huygens(1629 - 1695)持波动说。两者各有千秋,或者都需要借助力学模型来解释光的某些现象。但是,从 1800 年开始,由于 T. Young(1773 - 1829)的工作,波动说出现了辉煌时期。Young 提出干涉原理,并以此解释 Newton 环,引进波长,光行差原理,第一个近似地测定了光的波长,而且区分了相干光与不相干光的概念。接着, E. L. Malus(1775 - 1812)于 1809 年发现偏振,他本人认为这是 Newton 微粒说的证明。然而,1811 年 Arago 用晶体观察到被偏振的白光的色现象。D. Brewster(1788 - 1827)于 1815 年实验证实,

在反射光与折射光互相垂直的情况下,反射光是完全偏振的。同在 1815 年, A. J. Fresnel (1788 - 1827) 建立了带作图法的衍射理论, 并与 Arago 在 1819 年共同提出相互垂直的偏振光不相干涉的证明, 最终证实了光的横向振动。从此, 才建立了光的真正波动学说。直到 1888 年, Hertz 证实是电磁波的存在并将光统一在其中, 这又结束了光究竟是在那个方向上振动的争论。后来, H. A. Lorentz (1853 - 1928) 以反射理论, O. H. Wiener (1862 - 1927) 以光的驻波实验各自独立地证明, 电场强度的振动垂直于偏振面, 而磁场强度的振动在偏振面上。从此, 光学成为电动力学的一部分。

当人们的认识深入微观领域, 即当光电效应发现之后光的微粒论才得到复苏。而量子力学理论中关于光的波粒二象性的解释又最终在微观领域结束了历史上长达几个世纪的关于光的本性的争论。

(C) 经典物理学的困难和近代物理学的兴起

经典物理学在 19 世纪最后 20 ~ 30 年间, 达到了它的鼎盛时期。似乎一切物理问题都可以用它加以解决。然而, 正是在这几十年间以及 20 世纪初, 经典物理学在新的实验事实面前遇到了困难, 原本与实验相当吻合的理论受到挑战。首先, 长期来人们相信的绝对静止的惯性参照系“以太”, 而在 A. A. Michelson (1852 - 1931) 主持的反复多次的实验中均得到否定的结果; 再如, 在固体比热、黑体辐射、X 射线、放射性和镭的发现等新的实验事实中, 经典物理学不仅对此困惑不解, 且有大厦将倾之危。

一个德国出生的物理学家 A. Einstein (1879 - 1955) 看出了修补经典理论的不完备性, 默默地从事对物理理论根本性的改革。他于 1905 年和 1915 年先后创立了狭义相对论和广义相对论。相对论否定了 Newton 以来绝对时间和绝对空间概念, 并将 Newton 力学作为一种特例概括其中。相对论既是天体物理和宇宙学的理论基础, 也是原子内部微观物理学的理论基础。

Max Planck (1853 - 1947) 为解释黑体辐射问题, 于 1900 年提出能量子假设, 引入了著名的 Planck 常数。能量是由不可分的最小单元 (即能量子) 组成的思想在当时极为新奇。Einstein 在 1905 年从光电实验中提出光量子论, 从而证实并发展了 Planck 的思想。光量子论认为, 光具有连续的波动性质, 又具有不连续的粒子性质。从此, 波粒二象性作为微观世界的基本特性之一为人们所接受。此后, 经过将近 20 年的酝酿与准备, 尤其是在实验基础与工业技术的发展之后, 一批青年物理学家终于在 1924 - 1928 年间建立了量子力学, 其中有 L. de Broglie (1892 - 1987), W. K. Heisenberg (1901 - 1976), P. A. M. Dirac (1902 - 1984), Max Born (1882 - 1970), E. P. Jordan (1902 - 1980), E. Schrödinger (1887 - 1961), N. Bohr (1885 - 1962), W. Pauli (1900 - 1958) 等人。根据量子力学理论, 电子和一切微观粒子都有波动性, 又有粒子性, 揭示了微观物理世界的基本规律, 即波粒二象性 (duality)。量子力学的建立, 不仅逐步地解决了 19 世纪末的诸多物理问题, 同时加速了原子和分子物理学的发展, 并且成为物理学通向化学和生物学的桥梁。

19 世纪末 20 世纪初, 人们作出了关于 X 射线、放射性、镭等一系列惊人发现, 1905 年 Einstein 提出著名的质能关系式 ($E = mc^2$), 量子论也由初期解决辐射问题而进入到物质本体之中, 从而打破了原子不可分的古老观念, 人们对物质的认识从宏观深入到原子内的微观世界之中。1911 年, E. Rutherford (1871 - 1937) 提出原子模型。1913 年, Bohr 提出解释这个模型的量子假说。1932 年, J. Chadwick (1891 - 1974) 发现中子; J. D. Cockcroft (1897 - 1967) 和 T. S. Walton (1903 - ?) 用加速器实现人工核蜕变; O. Hahn (1879 - 1968) 和 F. Strassmann (1902 - ?) 发现铀分裂即重原子核裂变的现象。1942 年, 实现原子核链锁反应, 在 E. Fermi (1901 -

1954)领导下,建成第一座原子反应堆。1945年制成第一颗原子弹。从此揭开了原子能时代的序幕。

从1932年Chadwick发现中子开始,基本粒子物理学成为20世纪中期以来热门课题。新粒子性质、结构、相互作用和转化成为该学科主要研究内容。存在于自然界的四种力(引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力)作用的统一问题,物理学家们也付出了大量劳动,但距真正的统一尚待时日。在人类科学认识的历史长河中,最感兴趣的两个领域是:一为太阳系;一为原子结构。迄今,物理学已帮助人的“眼力”大到 10^{33} cm的宇宙,深到 10^{-17} cm的基本粒子内部。

从上述历史看,我们不能不注意到,整部物理学史亦是实验与理论互动的历史。实验技术不断革新与精密化,促成理论物理不断进步与完善;后者的进展又要求前者以更高精的程度为之验证。物理学在如此互动过程中,一点一滴、年积月累,构架起一座宏伟大厦。这过程中,一代代人前承后继为之默默地工作,付出毕生精力与智慧,也产生了许许多多伟人。

(Ⅲ)物理学与技术,物理学的功能

物理学与技术有着密切的联系,它们之间总是彼此互动、向前发展。此处所谓“物理学的功能”仅指物理学知识转化为技术之后所具有的功能。

经典物理学形成之初,磨镜与制镜工艺曾对物理学与天文学都有过帮助和促进。早先发明的眼镜以及在1600年左右突然问世的望远镜、显微镜,为Galilei等物理学家观察天体带来方便,也促使Snell, Descartes, Newton等一大批光学家对它从几何光学上进行研究。后者的成就又使得反射望远镜、折射望远镜和消色差折射望远镜在17,18世纪纷纷问世。各种望远镜的进步又推动物理学的发展,例如用它观察木卫的蚀以测定光速,发现光行差等等。当Newton等人建立起经典力学大厦时,现代一切机械、土木建筑、交通运输等工程技术的理论基础也得到初步确立。

18世纪60年代开始的工业革命,以蒸汽机的广泛使用为标志。起初,蒸汽机的热机效率仅为5%左右。为提高蒸汽机的效率,一大批物理学家进行热力学研究。J. Watt(1736-1819)曾根据J. Black的“潜热”理论在技术因素上改进蒸汽机。但是,当时尚未有人认识到汽缸的热只是部分地转化为机械功。此后,S. Carnot建立了热功转换的循环原理,Clausius又从Carnot循环中得到热力学第二定律。热与能等价的观念被人们普遍接受。热力学第一、二定律确立不久,英国土木工程师W. J. M. Rankine(1820-1872)于1859年就将它们编入《蒸汽机手册》之中,到20世纪初,蒸汽机效率达到15%~20%左右。这充分说明技术——物理之间的互动关系。

电磁学的所有重大成就纯粹是在物理实验室诞生的。Volta电池成功地获得了持续电流,开辟了利用电力的新时期。Oersted和Faraday建立的电磁感应定律,为电气时代的到来打下基础。特别是在实验室里用以演示感生电流的Faraday转子,原本近乎一种玩具,但它却是后来所有发电机和电动机的始祖。19世纪40年代及其之前创建的一系列电磁学定律,促成了19世纪80年代钢铁、电力、化学、内燃机为主流的技术大飞跃,实验室的成果孕育了工业技术领域的大批巨头和巨豪的诞生,如电机工业的W. von Siemens(1816-1892),钢铁工业的H. Bessemer(1813-1898)和Emile and Pierre Martin(活跃于1860-1870年代)等等。反之,在钢铁、冶金、电机方面的技术发展难题,尤其是燃料、能源的合理利用与成本问题又促进了19世纪最后20~30年间热辐射研究的迅猛发展。类似地,Maxwell方程和Hertz电磁

波实验,导致 G. Marconi(1847 - 1937)于 1895 年发明无线电。从而开创了无线电通讯技术的新时代,大大改变了人类的生活方式和文明进程。这又是物理——技术之间的互动事例。

20 世纪期间,最新物理学成果给予技术、社会的影响是最惊人的科学事件之一。Einstein 的质能关系导致原子弹制造和核能的利用,1917 年 Einstein 的受激发射理论又引出 1960 年激光器的诞生。在现代强大的技术装备中,引人注目的有:1932 年发明的回旋加速器,1934 年制成电子显微镜,1936 年发明射电望远镜,1957 年人造卫星上天及其后发展的宇宙飞船技术,遥感技术,60 年代建造的用作强中子源的实验性反应堆和电子同步加速器,等等。他们无一不是物理学的成果。除了原子能工业(始于 1942 年)、空间技术(始于 1957 年)与物理学直接相关外,当今电子计算机和信息革命是最为令人激动的技术革命。但它的硬件亦无一不与物理学成果相关,甚至就是物理学的实验结晶。从 1947 年 Bell 实验室发明晶体管,1962 年发明集成电路,到 70 年代后期出现大规模、高密度集成电路,其间多少物理学家在固体、晶体、半导体等物理学上奉献出自己日以继夜的工作成果,这需要有一篇长论文来叙述它。可以说,大至国防技术的导弹、核潜艇、宇宙飞船,小至每个家庭、每个个人身边的各种电器、电子仪器,以及为了健康而进入医院时所见到的放射性治疗、超声波扫描、核磁共振扫描等等,没有一件是与物理学毫不相干的发明物。物理学已经渗透到人类活动和文明生活的各个领域、各个方面。

正因为 20 世纪物理学与人类活动和人们生活密切相关,所以我们称物理学为“活的基础科学”,特别是将它的成果转化为技术后而给国家安危和经济贫富带来的巨大影响,人们又称它为“治国保家的基础科学”。在国际经济竞赛、市场竞争与知识经济活跃的今日,许多人惊讶:上百条的物理定律已化为成千上万吨的黄金。无论如何,就科学知识而言,今日不重视物理知识教育和普及的民族,将会变为世界民族之林中的灌木丛;而丝毫不懂物理学知识的个人,如果他没有他人的帮助,他将在现代文明生活中遇到在他人看来并非麻烦的许多麻烦。

(IV)古代中国的物理学

首先要指出,近代科学与古代科学的关系。前者是后者的继承和发展,但两者有着质的差异。古代科学,包括希腊、中国、印度和中世纪阿拉伯以及欧洲的科学,基本上处于现象的描述、经验的总结和思辩猜测的形式,其科学成就是直观、零散出现的。而以物理为标志的近代科学则是将系统的观察实验和严密的逻辑体系相结合,形成以实验事实为据,以简捷的数学描述为主要的系统的科学理论。

再则,“古代”的概念在中国与欧洲并不相同。欧洲历史时期分为古代、中世纪和文艺复兴等;而在中国,直到 1840 年鸦片战争之前,在历史学家看来都属于古代范畴。本文关于中国“古代”的时间含义从中国历史学家之说。当然,本文的叙述着重在 15 世纪之前的历史时期,相当于欧洲文艺复兴初期之前的历史时期。

中国古代有否科学或物理学,迄今为止,仍然众说纷云。很可能,有些人不自觉地带着经典物理时代、甚而近代科学的观念和标准来评判中国古代,因此得出“古代中国只有技术而无科学”的断言。这多少是不公平的。无论在技术,或是在科学上,从春秋战国到公元 13,14 世纪期间,中国人在大多数领域走在世界前列。这已为近几十年国际中国科学史家的研究成果所证实。

我们可以随便拣出一些例子,说明古代中国也有物理学。

据考古发现,在河南舞阳县贾湖村发掘了其上有开孔刻痕的 16 支骨笛,竖吹,7 孔,类似今日洞箫(图 1-1)。它们是公元前 6000 年的文化遗存。迄今仍可以奏出六声音阶或七声音阶。^① 它比古巴比伦 Ur 王陵和 Shubad 王后陵出土的歌舞石雕(2700 B.C.)要早 3000 多年。过去认为,中国的音乐和声学知识是从古希腊或古巴比伦传到中国的说法,已站不住脚了。至晚公元前 1000 年,西周人已能设计铸造双音钟,即一个钟壳发出两个基音。^② 从 Lord Rayleigh(1842-1919)总结经典声学理论的 Theory of Sound 于 1877 年出版以来,一个钟壳一个基音似是不证自明的公理。因此,1978 年湖北随县曾侯乙编钟(铸造于 433 B.C.)的出土,^③ 不仅其制作精美、数量之多、发音准确令人惊讶不已(图 1-2),而且动用了当代声学实验室最先进的仪器才发现其一钟双音的物理机制。^④ 上古舞阳人如何计算笛孔距离? 西周人有关壳振动知识又从哪里来的? 这是值得探讨的问题。



图 1-1 在舞阳贾湖出土的公元前 6000 年的骨笛
(引自《文物》1989 年第 1 期)

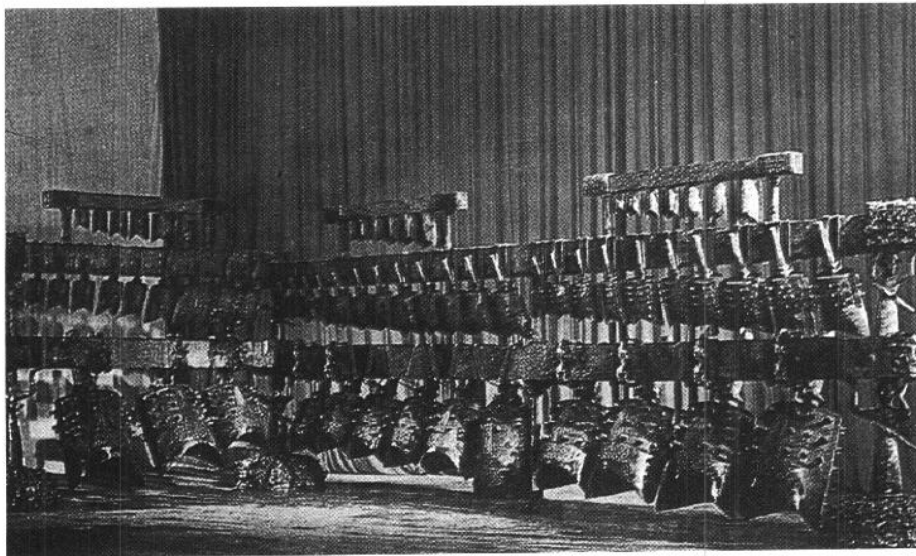


图 1-2 湖北随县出土的曾侯乙编钟
(引自《随县曾侯乙墓》,文物出版社,1980)

① 河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至六次发掘简报. 文物. 1989 年第 1 期, 1~14
黄翔鹏, 舞阳贾湖骨笛的测音研究. 文物. 1989 年第 1 期, 15~17
② 戴念祖. 中国声学史. 石家庄: 河北教育出版社, 1994, 421~425
③ 湖北随县曾侯乙墓发掘简报. 文物. 1979 年第 7 期, 1~39
④ 陈通, 郑大瑞. 古编钟的声学特性. 声学学报. 1980 年第 3 期, 161~171

春秋战国时期,以墨翟(生活于公元前5世纪至前4世纪初)为首的墨家写下了《墨经》一书。该书中大部分内容为逻辑学与自然科学,其中物理学占一定篇幅。《墨经》中物理学包括讨论杠杆、滑轮、斜面、浮体和平衡等静力学知识,也包括以连续8条文字讨论光的直进性质、光反射和各种镜子成像情形。例如杠杆平衡问题,《墨经》讨论了等臂天平和不等臂天秤的各种平衡情形,其结论也完全正确,就是没有数学公式,也缺少具体数据。这或许是与当时的书写用具即竹简有关。成书于春秋末年(约公元前5世纪)的《考工记》是一部手工技术的总汇,其中关于马拉车的惯性现象,车轮必须要圆的道理及判定其圆与否的方法;关于钟、鼓的形状、共振腔体的大小和长短对于发声的影响等的定性文字总结大概是世界上最早的有关文献。

秦汉开始,中国的钢铁技术一直遥遥领先于世界。这是中国古代科学所以发展的重要因素之一。汉代郑玄(127-200)根据弓箭制造及其弹性力大小的长达几百年的测量数据,归纳出 R. Hooke(1635-1703)在17世纪才表述的弹性定律。^① 在汉代成书的《尚书纬·考灵曜》中清楚道出 Galilei 相对性原理或力学相对性原理的古老说法:

“地恒动不止,而人不知。譬如人在大舟中,闭牖而坐,舟行而人不觉也。”

宋代李诫(?-1110)在其著《营造法式》中指出,具有最佳强度的横梁高宽比数为3:2。这已达到了 T. Young 时代的材料力学水平。

在本草药物与炼丹著作中,中国人仔细观察并总结了大量晶体的几何形状、对称性、腭形性,甚至发现某些晶体的变色、变彩现象。有关固体与晶体的知识远远走在科学发展的时代前面。例如,汉代韩婴(生活于公元前2世纪)的《韩诗外传》(成书于140-135.B.C.)首次观察记载了雪花的六重对称,比 J. Kepler(1571-1630)于1611年元旦时写的《六角形的雪》早1700余年。

在古代数学著作中,有大量的算题是在时间、速度、平均加速度、路程等物理因素之间设定的,若将它们汇编在一起亦不失为一本初等运动学习题集。这在中世纪的欧洲是从未发生过的事。例如,《九章算术》卷七《盈不足》第四问写道:

“今有良马和弩马,发长安至齐。齐去长安三千里。良马初日行一百九十三里,日增十三里;弩马初日行九十七里,日减半里。良马先至齐,复还迎弩马。问几何日相逢?”

古代人以“盈不足术”解此类算题:假令良弩二马于第15日相逢,则不足 $337\frac{1}{2}$ 里;假令这二马于第16日相逢,又盈余或多出140里。于是,在“盈”与“不足”之间找到一种计算方法。我们不妨以物理学中运动公式去解它:将良弩二马的日增里数看成是加速度值,并确定它们第一天的初速度值(算题中第一天的里数是平均速度值,将它看成第一天的路程即可得初速度),于是可得到和《九章算术》几乎相同的答案,只是在以里为单位的小数点下三位稍有误差。这一误差是由于《九章算术》解题采用的是平均加速度值,而我们今日的运动公式中所要求的是瞬时加速度值。值得注意的是,魏晋时刘徽(生卒年不详)在注解这道题时,分别将日增里数和日减里数称之为“益疾里”和“减迟里”。可以说,这是加速度概念在 Galilei 之前的滥觞。

在光学方面,古代中国人也有不少成就。至少在“透光镜”(即不等曲率反射镜)的制造方面成绩惊人。汉代人发明的“透光镜”(图1-3)在唐代传入日本,并被日本称为“魔镜”。弄清它的“透光”机理问题曾引起19-20世纪之间的光学家和物理学家从1832年起断断续续地整整100年的兴趣。其中包括 David Brewster(1781-1868), D. F. J. Arago(1786-1853)等

^① 老亮. 中国古代材料力学史. 长沙:国防科技大学出版社,1991,11-29,以下我们不一一列出文献,因为本书以下各章中会涉及这些重要历史事实和文献书目。

人,以及 1877 年 Nature 杂志开办的专题讨论,直到 1932 年 W. H. Bragg(1862 - 1942, 1915 年获诺贝尔物理学奖)以“论中国‘魔镜’”为题写下了总结性文章。^①事实上, Bragg 解释“透光镜”的物理观点已由清代郑复元(1780 - 1853 年之后几年)在其 1835 年初稿的《镜镜论痴》中阐述了。此外,阳燧(凹面镜)、复合透镜、潜望镜也是中国人最早发明的。遗憾的是,古代中国人似乎始终未曾注意到入射角与反射角相等的知识。

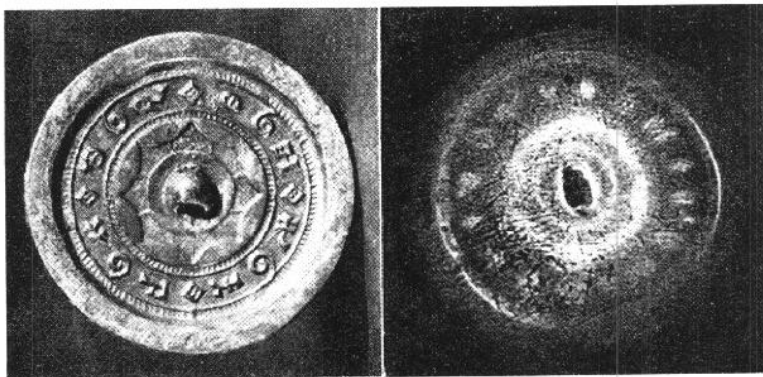


图 1-3 上海博物馆藏西汉透光镜(左)及其反射光斑(右)。镜背面铸有“见日之光,天下大明”字样。反射光斑与镜背图案类似。(引自阮崇武,毛增滇,中国‘透光’古铜镜的奥秘,上海:上海科学技术出版社,1982)

在电和磁方面,古代中国人不仅仅发现“琥珀拾芥”现象,还发现了玳瑁、头发、羽毛、猫皮、丝绸、漆干等物质的起电现象,并观察到静电放电火花和响声。在欧洲,它们基本上是由 R. Boyle(1627 - 1691)和 Newton 等人才发现的。指南针和罗盘(图 1-4)的发明,磁偏角的发现和磁倾角的应用,这已是众所周知的中国科学史事实。

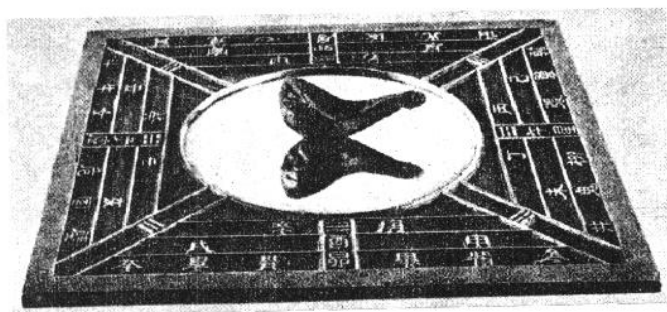


图 1-4 秦汉时期的司南(王振铎复原)和明代铜质水罗盘
(引自王振铎,科技考古论丛,北京:文物出版社,1989)

在声学方面,也即在关于确定弦长与其音高关系的知识方面,古代中国人的成就不能不让人肯定古代中国有物理学。

确定振动体长度与其音高关系的科学,中国古代称为乐律学,即音乐学与律学的总称。“律学”在英语词汇中无对应词,或可英译为 theory of tuning and temperament。已有考古文物和文字记载证明,至晚在公元前 6 世纪,中国人已建立了“三分损益法”(the rule of addition or

^① W. H. Bragg, On Chinese 'Magic Mirrors', ILN, 181 (1932), 706

subtraction of a third 或简译为 the rule of third)。它本质上与西方“五度相生法”相同。但是,前者倾向于数学法则,后者倾向于五度和谐;前者表述的是一个音阶内各个乐音的数学联系,后者表述的是前后两者的音乐规律。三分损益律在中国历史上发展到淋漓尽致的地步,以致刘宋朝何承天(370-447)、隋唐时期祖孝孙(生活于6世纪下半叶到7世纪上半叶)等人从三分损益法计算出发,而获得了倾向等程律(equal temperament)的结果,比Galilei的父亲Vincenzo Galilei(约1530年代后期-1591)在西方依照带品柱乐器所创建的初期等程律(其相邻两律之比为18:17,相当于99 cent,但它与相邻两律的音程为100 cent的等程律有着质的差别)要早千余年。明代王子朱载堉(1536-1611)在1581年之前创建十二等程律(twelve-tone equal temperament),其律制及求解等比级数的数学方法比法国数学家Marin Mersenne(1588-1648)在1636年建立同样律制要早50多年,比荷兰物理学家Simon Stevin(1508-1620)也要早10~20年。至于中国人以实验方法发现管乐器末端效应(the end effect of pipe)和管口校正(the end correction of pipe)数据更要早于西方。

声学在中国古代所以发达也有其原因:一、历代皇朝几乎都有歌舞音乐学校,有庞大的歌舞音乐队,不少皇帝本人也精通音乐、喜好音乐,如战国时赵王烈侯(409-400 B.C. 在位),唐玄宗李隆基(682-762)等等;二、历代皇朝都设有专管礼乐的行政机构,称为“太常”、“太常寺”,其主管官员称为“太常卿”,以下各级有太常博士、协律都尉,协律中郎将,钟律令等,他们官品不高却可以参与朝政;三、作为支配历代封建皇朝的思想体系儒家学术是重视音乐文化的;四、有能力和创造性的调律人和调律官往往能得到朝廷奖赏,提拔重用,他们的业绩也被记录于历代正史之中。这在古代其他民族或国家看来,简直是不可思议!即使在今天,一个技术高超的钢琴调律师也只能手提工具箱,穿行于大街小巷,为生活忙碌辛劳。

仪器制作和实验,在古代也有不少成就。例如,用于演示回转运动的回转仪或陀螺仪,是由平衡环和陀螺组成的。而平衡环和陀螺都是古代中国人最早创制的。平衡环在汉代称为“被中香炉”,“熏炉”(图1-5),且历代屡有制造。中学课堂上采用的液体表面张力演示器,在宋代桐油市场上几乎买卖人均手执其一,以表面张力现象来检验桐油的品质。虹吸管自汉代以来的应用,滴定管(或滴量管)在唐宋时期的普遍性,均引起人们对大气压现象的种种讨论。至于计时器,基本度量器(例如尺)及其标准的选定,已是众所周知的事。在实验方面,墨翟以暗匣演示光的直进性;小孔成倒像的实验为历代人们所注意;宋末元初赵友钦(生活于13世纪)以上千支烛光布置于4尺(约合今1.3 m)直径的圆板上作光源,在改变光源(烛光的多寡与其排列的疏密)、小孔(形状与孔面积的大小)、物距与像距各因素时,观察小孔成像情形。虽实验结果不是定量的数据,但这个实验很好地说明了影响小孔成像的物理



图 1-5 1970 年西安何家村出土的唐代银熏球
(引自《中国大百科全书·物理学》)