

的能量),并相互作用,那么场空间的能量必定如同物质粒子那样具有惯性和动量,亦即电磁场能量应当具有惯性质量.何以见得场也是一种具惯性的物质呢?这就是爱因斯坦完成相对论论文后要解决的问题.为此,爱因斯坦于1905年在《德国物理学杂志》上发表了“物体惯性同它的所含的能量有关吗?”一文.他证明,一个静止在 $K$ 系中的光源发射辐射所损失的动能 $\Delta E$ ,相对于另一个惯性系数 $K'$ 而言等于 $Lv^2/2c^2$ ,其中 $L$ 是辐射损失的能量, $v$ 是 $K$ 系相对于 $K'$ 系的速度.他认为,电磁场能量的损失正如一个质量为 $m$ 的物体的动能的损失, $\Delta E_k = \Delta[(1/2)(mv^2)]$ .由此得到: $\Delta E_k = \Delta mc^2$ .

1907年,爱因斯坦在将动能损失与质量的关系推进到物质的全部“潜能”与惯性质量的方面时,发现了质能定律<sup>[14]</sup>:

$$E = mc^2,$$

这里的 $E$ 是能量.他建议用镭的放射衰变过程来证明这一关系.有意思的是,在爱因斯坦质能定律发现前,放射性研究也曾经历过类似过程.那就在 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线在1898年被发现后好几年中,这两种能量物质仅被当作某种电磁波辐射产生的射线,只是经过卢瑟福(E. Rutherford)等人反复用电场和磁场偏转这两种射线,并分别测量出它们的质荷比后,它们才在1902年被最后确定为带电的、有能量的物质粒子,才被赋与了 $\alpha$ 粒子和 $\beta$ 粒子的名称.这是一个为物质粒子“正名”的过程.而爱因斯坦质能当量关系的发现,则是从“无质”场与有重物质的关系出发所发现的一个普遍性定律的过程.在科学思想上,这二者的发现存在某种必然的联系,但爱因斯坦的发现具有更为深远的意义.由于篇幅限制,这一问题拟另文讨论.下面,本文将转向研究19—20世纪之交

电磁学的实验研究方面.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 宋德生,李国栋.电磁学发展史.第1版.南宁:广西人民出版社,1987.12,14,16—17,19—21章;第2版.1996.第21章[ SONG De-Sheng, LI Guo-Dong. A History of Electromagnetism. 1st ed. Nanning: Guangxi People Publisher, 1987. 12, 14, 16—17, 19—21th Chapters; 2nd ed. 1996. 21th chapter(in Chinese) ]
- [ 2 ] 宋佰谦.电学中的牛顿——安培.南宁:广西人民出版社,1992.第3—5章[ SONG Bai-Qian. Ampere—Newton in Electricity. Nanning: Guangxi People Publisher, 1992. 3—5th chapters(in Chinese) ]
- [ 3 ] 宋德生.物理,1985,14:184[ SONG De-Sheng. Wuli (Physics), 1985, 14:184(in Chinese) ]
- [ 4 ] 宋德生.自然杂志,1986,9(1):55[ SONG De-Sheng, Nature Journal, 1986, 9(1):55(in Chinese) ]
- [ 5 ] Lorentz H A. Collected Papers, Hague, 1937, 44:164
- [ 6 ] Larmor J. Phil. Mag., 1897, 44:506
- [ 7 ] 宋德生.自然辩证法通讯,1987,9(3):59[ SONG De-Sheng. Journal of Dialectics of Nature, 1987, 9(3):59(in Chinese) ]
- [ 8 ] Mc Cormmach R. Historical Studies in The Physical Sciences, 1970, 2:44
- [ 9 ] Dorling J. Brit. J. Phil. Sci., 1971, 22:2
- [ 10 ] Einstein A. Annalen der Physik, 1905, 17:132; American Journal of Physics, 1986, 33:367.
- [ 11 ] 爱因斯坦著.范岱年,赵中立,许良英译.爱因斯坦文集(第二卷).北京:商务印书馆,1977,2:37—53[ Einstein A. ed. FAN Dai-Nian, ZHAO Zhong-Li, XU Liang-Ying trans. The Collect Papers of Albert Einstein( Vol. 2). Beijing: The Commercial Press, 1977, 2:37—53(in Chinese) ]
- [ 12 ] 宋德生.物理,1987,16:757[ SONG De-Sheng. Wuli (Physics), 1987, 16:757(in Chinese) ]
- [ 13 ] Einstein A. Annalen der Physik, 1905, 17:891
- [ 14 ] Einstein A, Jahrbuch der Radio-aktivitat, 1907, 4:442.

(未完待续)

## 牛顿对热力学的贡献\*

史 贵 全

(中国科学技术大学科技史与科技考古系 合肥 230026)

**摘 要** 针对学术界对牛顿热学成就的研究较为薄弱的状况,详细论述了牛顿在计温术和传热学上所取得的成果,并分析了其发现冷却定律的背景,指出该定律的发现与他长期从事冶金试验密切相关;探讨了牛顿对热的本质与若干热现象的见解及其历史价值.

**关键词** 牛顿,计温术,冷却定律,热的本质

\* 2000-06-02收到初稿,2000-07-21修回

# NEWTON'S CONTRIBUTIONS TO THE PHYSICS OF HEAT

SHI Gui-Quan

(Department of Scientific History and Archaeology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** To make up for the lack of research into Newton's achievements in the physics of heat, this paper discusses in detail Newton's contribution to thermometry and heat transfer theory, analyzes the background in which he discovered the law of cooling, and points out that this discovery of the law was closely related to his many years of metallurgical experiments. Newton's views on the nature of heat and various heat phenomena and their bearing on the history of science are also explored.

**Key words** Newton, thermometry, the law of cooling, nature of heat

从16世纪末伽利略发明验温器开始,经过整个17和18世纪,热学才发展成为一门定量的科学.牛顿时代的许多科学家为此投入了大量的时间与精力,取得了一系列成果.而牛顿在其物理学研究生涯中主要将智慧与时间奉献给了力学与光学,甚至多年在冶金炉旁挥洒汗水,对热学研究似无暇多顾.尽管如此,牛顿对计温术和传热学所作出的独特贡献足以确立他在热学早期历史上的重要地位;他对热的本质的见解亦有独到之处.事实上,他在光学实验,尤其是在冶金试验中所接触到的大量热现象为他在热学研究上结出硕果提供了丰厚的土壤.然而,目前所见的物理学史论著往往重在阐述牛顿在力学与光学上的伟大成就,而对他在热学上的贡献则少有涉及.本文拟通过对牛顿有关论著的考察,对这位科学伟人在热学上的贡献做一较为全面的探讨.

## 1 牛顿对实验热学的贡献

17、18世纪之交是计温术发展的成熟时期.当时有不少人如英国的玻意耳(Robert Boyle, 1627—1692)、哈雷(Edmund Halley, 1656—1742)、法国的阿蒙通(Guillaume Amontons, 1663—1705)都致力于温度计的制作和完善.牛顿在这一时期也从事计温术的研究,但他的成果到很晚才发表.1701年的英国《哲学学报摘录》第二册上载有牛顿关于实验热学的一篇论文“热的温度表”<sup>[1]</sup>.这篇论文中的“温度表”给出了从冰雪的熔点、煤火的温度等一系列有价值的数值.其中包括人的体温、熔化蜡的温度、水的沸点,而锡、铅、铋、锑等低熔点金属及其合金的熔点占据了大部分篇幅.牛顿还论述了制定这个温度表所依据的基本思想及具体的实验操作.事实上,这篇论文的基本内容反映了牛顿在实验热学上的两

项重要成果:其一,牛顿创制的、最早用作有效观察的一种温度计;其二,牛顿发现的、以后以他的名字命名的冷却定律以及利用该定律所作的高温测量实验.

### 1.1 牛顿温度计

牛顿温度计以亚麻子油为测温物质,以冰雪熔点为零度,而把人的体温规定为12度,并假设温度与亚麻子油的膨胀成正比<sup>[1]</sup>.为了清楚地了解牛顿温标,我们考察一下他在“热的温度表”一文中所描述的一个测温实验.牛顿将熔雪状态时温度计中亚麻子油的体积取为10000个单位.然后使温度计分别与人体、开始沸腾的水、剧烈沸腾的水、开始凝固的熔锡进行热接触,依次测得温度计中亚麻子油的容积为10256、10705、10725、11516个单位.根据前已述及的温标,牛顿求得开始沸腾的水、剧沸的水、开始凝固的熔锡的温度分别为33度、34度、72度.如果用数学公式表示,牛顿温标为

$$T = (V - 10000) \cdot 12/256.$$

笔者曾将牛顿温标换算为摄氏温标,发现牛顿测出的小于亚麻子油沸点的各种状态的温度值与采用摄氏温标的现代玻璃水银温度计所测之值相差甚小.可见,牛顿温度计的精确度是较高的.这是它成为近代早期较为实用的测温仪器的原因之一.

如上所述,牛顿温度计采用的是两定点分度法,就18世纪前期华氏温标出现之前的计温术水平而言,这是一个不小的进步.与牛顿同时代的一些头脑敏锐的科学家,如玻意耳、胡克(Robert Hook, 1635—1703)、惠更斯(Christian Huygens, 1629—1695)等虽然都意识到了在液体温度计上设立定点的必要性,但他们都认为只需要一个定点而不需要两个定点<sup>[2]</sup>;法布里(H. Fabri)、达朗塞(Dalencé)等虽然先于牛顿提议使用两个定点的分度方法,但并

未付诸实践<sup>[3]</sup>.而牛顿独创了采用冰雪熔点与人的体温两定点分度法的亚麻子油温度计,并用这种温度计进行了一系列精彩的测温实验,使其成为最早用作有效观察的一种温度计,且促进了两定点分度法的推广.由于牛顿温标较之当时其他温标具有一定的优越性,加之牛顿在科学界的崇高声望,他的测量思想对尔后的计温术产生了积极的影响.华伦海特(O. G. Fahrenheit, 1686—1736)于1714年创立华氏温标时可能受到了牛顿温标的启发.他最初也把人的体温定为12度(后来改为96度),并且作为他温度计上的一个固定点<sup>[4]</sup>.19世纪50年代,开尔文在制定绝对热力学温标的分度法时同样吸取了牛顿的测温思想.开尔文写道:“根据艾萨克·牛顿爵士的建议,按照温度对于某一特殊物质或几种特殊物质的特殊效应,择定两个定点.称其温度差为一个单位,或依所需划分为若干单位或度”<sup>[1]</sup>.

## 1.2 牛顿冷却定律与高温测量实验

牛顿在编制他的“温度表”时,为了求得熔点高于亚麻子油沸点的某些金属及合金的熔化温度,提出了一个后来以他的名字命名的冷却定律;借助于该定律,并用一块厚铁板作辅助工具,成功地达到了他的目的.牛顿在“热的温度表”一文中是这样表述冷却定律的:“炽热的铁在一个确定时间里传给附近物体的热,即这铁在一定时间里所失去的热,视这铁的总热量而定;因此,如果取若干相等的冷却时间,那么这些温度将成几何比”<sup>[3]</sup>.由于在牛顿所处的时代,科学界还没有从概念上区分开温度与热量二者的不同,这两个概念往往被混为一谈.因此,在这个表述中“铁的总热量”,事实上指的是铁在某一时刻的温度.尽管牛顿对这一定律的表述是不够确切的,但他在关于借助该定律所作的测温实验的描述中,使其含义变得明确起来,相当接近于现代物理教科书中的标准陈述.牛顿的实验操作如下:使加热到发出辉光的铁板在自然通风条件下冷却,将各种金属及合金试样置于其上,各试样液化后随着大铁板的冷却将陆续开始凝固,从各试样开始凝固时起分别观察记录它们的冷却时间,直到铁板表面温度降到人的体温时为止.“然后,根据这样一个假定,即当时间依算术级数增加时,温度计所表示的铁和硬化物体超过大气的温度依几何级数增加,以测定一切温度”<sup>[1]</sup>.这里的“假定”实际就是积分形式的牛顿冷却定律,即

$$T_0 - \theta = (T_f - \theta)e^{kt}, \quad (1)$$

而微分形式的冷却定律为: $\frac{dT}{dt} = -K(T - \theta)$ . (2)

(2)式可用文字表述为:一个物体在任一时刻的冷却速率与其同周围介质的温差成正比.

(1)式中, $T_0$ 是某一试样由液态开始凝固时的温度,而 $T_f$ 代表该试样冷却的终了温度(此处选择的是人的体温), $\theta$ 表示环境温度, $t$ 是试样开始凝固至其温度降到人的体温所经历的时间, $k$ 是一常数.这样,牛顿通过测量试样的冷却时间,借助于他发现的冷却定律就可将用当时的温度计无法直接测量的某些金属及合金的熔点用他的温标来表示.

牛顿给出的低熔点金属及其合金的熔化温度与它们的现代值相比,误差较大.其主要原因在于牛顿不了解他发现的冷却定律的适用条件.后来杜隆(Pierre Louis Dulong, 1785—1838)和珀替(Alixis - Thérèse Petit, 1791—1820)通过实验检验,发现该定律仅在物体与其周围介质的温度差较小时才成立<sup>[5]</sup>.而牛顿在实验中作辅助测温工具的赤热铁板与其周围大气的温差甚大.若在这里指出下面的史实也许有助于人们用历史的眼光公允地看待牛顿测量结果的粗陋:牛顿发现的冷却定律是有关传热现象的第一个定律,当杜隆和珀替发现了该定律与事实的偏差并进行修正时,已是该定律面世一百年之后的事了;牛顿的高温测量实验也远远走在了时代的前面,因为直到18世纪40年代科学界才开始关注高温的定量测试问题;第一个适用于高温测量的温度计在牛顿测温实验之后过了40年才研制出来.

牛顿的功绩不仅在于他发现了至今仍在广泛应用的作为对流换热基本计算公式的冷却定律,更有意义的是牛顿测温实验构思的巧妙,方法上的创新.牛顿时代研究计温术的人仅限于将温度计与被测对象进行直接的热接触来读取数据,而牛顿却将数学公式与测温仪器结合起来,通过非温度量的测量而得到了用当时的温度计无法直接测读的较高温度的数据.这种间接测量法虽不是肇始于牛顿,但经过这位善于将抽象的理论洞察力与实验技能结合起来的科学大师的发展和完善而成为近现代科学实验中最基本的方法之一.

## 1.3 牛顿发现冷却定律的背景

笔者认为,牛顿冷却定律的发现与他热衷于炼金术和化学,并长期从事冶金试验有密切的关系.“牛顿在炼金术和化学上所花费的时间,比花在使他成名的物理学上的,可能还要多些”<sup>[6]</sup>.据载,牛顿在剑桥大学他住房附近亲自砌了一座用于冶金试验

的熔化炉,做了大量有关金属及合金特性的实验;为了得到一种熔点很低的合金,牛顿在1693—1695年间进行了不懈的实验探索;牛顿在1696—1699年主持铸币工作期间曾对一些合金的性能,尤其是熔铸速度做过观察与试验.这些活动必定涉及到温度的测量,而金属和合金试样的熔化温度及其冷凝速度无疑是他研究的内容之一.但绝大多数的金属及合金的熔化温度远高于当时液体温度计中测温物质之沸点,直接测读是不可能的,这势必促使牛顿另辟蹊径.热物体与周围介质的温差越大,冷却得就越快,单位时间内散失的热量也越多.这种现象对牛顿来说是颇为熟悉的.极有可能,正是这些经验事实使善于运用归纳推理的牛顿意识到了热物体的冷却速率与其超出周围介质的温差之间存在正比关系.从“热的温度表”一文的结尾部分可以看出,牛顿运用这个关系对一个可以用他的亚麻子油温度计直接测读的散热过程进行过测算.实验结果表明计算值与用温度计直接测量的值是一致的.这样,牛顿发现的这个事实便成为他以后估算金属熔化温度及进行有关热学实验的一个理论依据了.总之,笔者想说明的是,冷却定律的发现并非偶然,而是他长期从事冶金试验的必然结果.

## 2 牛顿关于热的本质及若干热现象的见解

牛顿是一个彻底的原子论者.牛顿学说中的许多论点是建立在物体是由微小粒子构成的这一基本观念之上的.而且,牛顿还相信:构成物体的微粒子总处于一种不停息的运动之中,“而振动正是它们的热和活动性的由来”<sup>[7]</sup>.牛顿在热的本质问题上虽然坚持运动说,但与17世纪流行的热之唯动说是有所不同的,其区别就在于他把以太振动机制引入热运动理论中,并用这种观点解释物体内部光的吸收、光与热的相互转化、热的辐射等现象,并提出了一系列闪烁着启发性光辉的见解,从而使他的关于热的本质的思想得到了进一步发挥,较之于同时代玻意耳、胡克等人的观点更为精致,更富有理论性.牛顿的这些见解见之于他在1717年出版的《光学》的第二版,但其中的主要观点很早以前就形成了.

众所周知,牛顿对光学现象进行过大量的观察和精湛的实验研究,而光学现象在许多情况下往往伴随着一定的热效应.光为什么可以使物体发热?牛顿根据他对热的本质的见解对这一现象的内部机制进行了解释.在牛顿看来,光系由十分精细的粒子

构成,而一般宏观物体则由粗大的粒子聚集而成.光这种微细的东西似乎难以引起物体的粗大粒子的运动.他认为以太是光对物体发生作用的媒介.他设想以太的结构与空气的相似,但远比空气精细、稀薄、更富有弹性,且能渗透到一切物体的孔隙之中.当光照射到一物体上时,首先“使愈纤细的以太加热并使之运动”<sup>[7]</sup>,以太媒质又将运动传输给物体的粗大部分.由于“每一条光线的激动可能产生数千次的振动,把它们送到物体各处,就可以使它的每一部分都运动起来,……因为振动使每个质点向前后摇动,而每一次这样的摇动都可以使它的运动增加,正象一个打钟的人不断拉动钟槌使钟的运动增加一样;这样,到最后粒子就以极大的激动程度运动”<sup>[7]</sup>.这样,在宏观上就表现为被光照射的物体变热了.这就是牛顿设想的物体内部光的吸收及光能转化为热能的机制.

当物体被加热,热到一定程度时就会闪耀发光.牛顿把这种后来称为热辐射的现象视为光在物体内部被吸收而生热过程的逆过程.他猜想这种光是由物体内部各部分的振动引起的.而以太在这个过程中作用是使这种振动持续和加强,激励受热物体向外发射光与热<sup>[7]</sup>.

牛顿还探究了真空中的热辐射现象.他设计了一个实验并观察到:在其他条件完全相同的情况下,当环境温度升高或降低时,处于真空容器中的温度计与非真空容器中的温度计之温度上升或降低的幅度与速度几乎完全相同<sup>[7]</sup>.这个实验结果和其他一些类似的观察促使牛顿对热辐射产生了一种看法,认为热通过以太媒质之振动而辐射,这种媒质甚至在没有空气的地方也存在.不过,牛顿并没有明确地陈述他的这种观点,他只是把它隐含在其《光学》第二版中所提的那些问题里<sup>[7]</sup>:以太媒质是否在空气被抽出后仍留在真空中?暖处的热是否是由以太媒质的振动穿过真空传过去的?热物体是否借助于以太的振动将热传给其邻近的冷物体?

牛顿的上述研究工作远远地走在他所处时代的前面.他提出的这些重大问题是19世纪许多优秀科学家所研究的重要课题.尽管牛顿表述这些问题所用的一些概念本身带有局限性,甚至后来被人们否弃了,但这些问题所指示的研究方向以及牛顿以其深邃的洞察力所提出的颇具预见性的设想,无疑对后继研究者具有巨大的启迪作用.

应该指出的是,一些物理学史论著往往笼统在将牛顿对热的本性的见解等同于17世纪流行的玻

意耳、胡克等人的热之唯动说,而对在牛顿热学思想中扮演重要角色的以太概念似乎不屑一顾<sup>[8]</sup>。诚然,牛顿本人后来对以太是否存在犹豫不决,但探讨其热学思想中的以太概念对了解这位科学伟人的思想演变却不无裨益;以太概念最终被否弃了,但它作为人类在认识热、光等物理现象之本质的过程中所提出的一种假说,在从17世纪下半叶到20世纪初的250多年的历史中,对许多科学家的思想产生过重要影响。因而,探讨它在物理学发展过程中的作用,对于我们正确认识科学概念和科学理论演变进化的历史无疑是有其认识论价值的。

致谢 本文初稿承蒙笔者导师中国科学技术大学教授张秉伦先生审阅,在此表示衷心感谢!

### 参 考 文 献

[ 1 ] 威·弗·马吉编,蔡宾牟译.物理学原著选读.北京:商务印书馆,1986.139—142,262[ Magie W F ed. CAI Bin - Mou trans. A Source Book in Physics. Beijing: The Commercial Press, 1986.139—142,262(in Chinese) ]

[ 2 ] Crew H. The Rise of Modern Physics. 2nd Ed. Baltimore: The Willams and Wilkins Company, 1935.199

[ 3 ] 亚·沃尔夫著,周昌忠等译.十六、十七世纪科学、技术和哲学史.北京:商务印书馆,1984.105—106[ Wolf A. ZHOU Chang - Zhong *et al* trans. A History of Science, Technology,

and Philosophy in the 16th and 17th Centuries. Beijing: The Commercial Press, 1984.105—106(in Chinese) ]

[ 4 ] П.С库德里亚夫采夫,И.Я康费杰拉托夫合著.梁士元等译.物理学史与技术史.哈尔滨:黑龙江教育出版社,1985.181[ Kudriachaiv P S, Kaufjeiratorov I A. LIANG Shi - Yuan *et al.* trans. A History of Physics and Technolgy. Haerbing: Heilongjiang Education Press, 1985.181 (in Chinese) ]

[ 5 ] R. J. 弗伯斯, E. J. 狄克斯特霍伊斯合著.刘 等译.科学技术史.北京:求实出版社,1985.253 [ Forbes R J, Dijksterhuis E J. Liu Jun - Jun *et al* trans. A History of Science and Technology. Beijing: Realistic Press, 1985.253(in Chinese) ]

[ 6 ] W. C. 丹皮尔著.李珩译.张今校.科学史及其与哲学和宗教的关系.北京:商务印书馆,1975.241 [ Dampier W C. Li Heng trans. Zhang Jin collat. A History of Science and Its Relations with Philosophy and Religion. Beijing: The Commercial Press, 1975.241(in Chinese) ]

[ 7 ] H. S. 塞耶编.上海外国自然科学哲学著作编译组译.牛顿自然哲学著作选.上海:上海人民出版社,1974.184,113,103,169,323[ Sayer H S ed. Shanghai Group of Translation and Edition for Foreign Philosophy of Nature Science Writings trans. Newton' s Philosophy of Nature; selections from his writings. Shanghai: Shanghai People' s Press, 1974.184,113,103,169,323(in Chinese) ]

[ 8 ] 广重彻著.李醒民译.物理学史.北京:求实出版社,1988.108[ Tetu Hirosige. Li Xing - Min trans. A History of Physics. Beijing: Realistic Press, 1988.108(in Chinese) ]

## 2001年第3期《物理》内容预告

### 研究快讯

高温超导体电子态相图的新认识(闻海虎)。

### 评 述

晶体生长的缺陷机制(王继扬)。

### 知识和进展

地球深部探索与高压研究(谢鸿森等)；

强激光天体物理学研究——在强激光实验室中模拟某些天体物理过程(夏江帆等)；

中微子振荡实验——超出标准模型的实验检验(II)(何景棠)；

核爆模拟——惯性约束聚变在核武器上的应用(曾先才)；

量子点或纳米材料发光现象——界面极化子和多孔硅发光(邹炳锁)。

### 物理学和高新技术

真空激光自动监测大坝变形技术(王绍民)。

### 实验技术

高分辨的弹性反冲探测分析技术(路秀琴等)；

一种测量液体粘滞系数的新方法(郭敏)。

### 讲 座

量子器件物理讲座第一讲 异质结和量子结构(余金中)。

### 物理学史和物理学家

19—20世纪之交电磁学的发展和影响(宋佰谦)。