


中国科学技术大学  教材

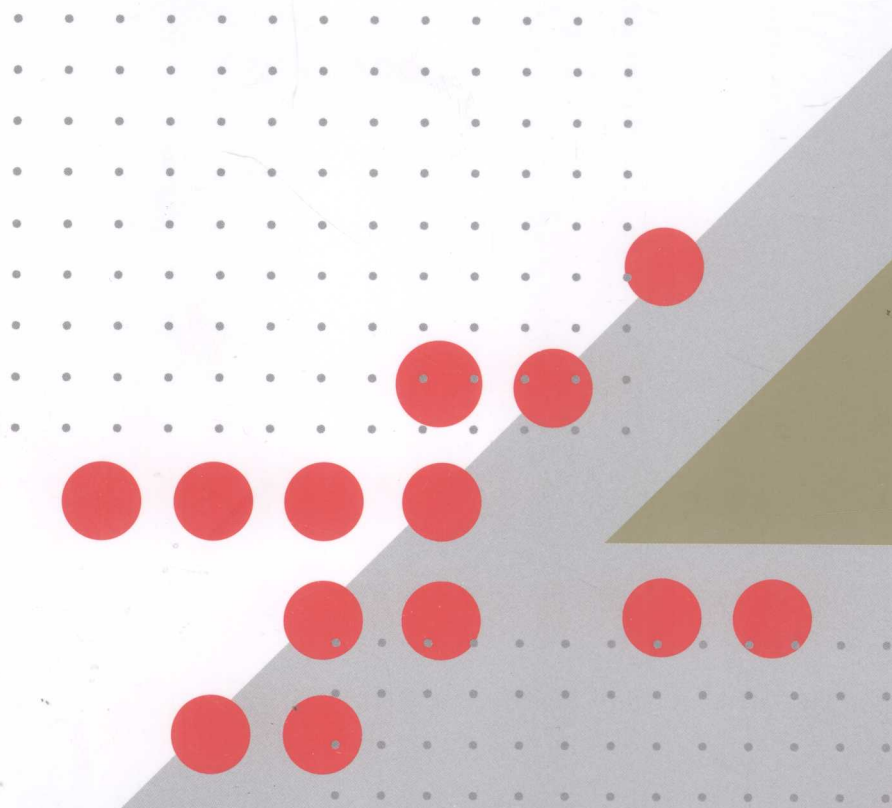
“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 交叉学科基础物理教程

主 编 侯建国 副主编 程福臻

热 学

朱晓东 编著



中国科学技术大学出版社

014040763

中国科学

0551

“十二五”国家重点

35

中国科学技术大学 交叉学科基础物理教程

主 编 侯建国 副主编 程福臻

热 学

朱晓东 编著



北航 C1728128

中国科学技术大学出版社

0551

35

内 容 简 介

本书作者在中国科学技术大学长期讲授本科生的热学基础课,具有丰富的教学经验。在参阅多部国内外优秀教材和多年教学积累的基础上,作者试图编写一本适应交叉学科人才培养的需求、具有时代气息的热学教材。内容以温度为主线,热与温度相呼应、微观和宏观相配合,力图给读者以清晰完整的物理图像。书中重视热学理论与实践的联系,重视学科的新发展和新成就。书后亦附有大量的习题,供读者有针对性地选择练习,以加深对课程内容的理解,培养利用所学理论、知识解决实际问题的能力。

本书可作为综合性大学和理工类院校普通物理热学教科书或主要参考书,亦可供大专院校相关专业及科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

热学/朱晓东编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2014.5

(中国科学技术大学交叉学科基础物理教程)

中国科学技术大学精品教材

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03183-0

I. 热… II. 朱… III. 热学—高等学校—教材 IV. O551

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 023169 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:880 mm×1230 mm 1/16 印张:21 字数:465 千

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

定价:68.00 元



序 ■

物理学从17世纪牛顿创立经典力学开始兴起,最初被称为自然哲学,探索的是物质世界普遍而基本的规律,是自然科学的一门基础学科。19世纪末20世纪初,麦克斯韦创立电磁理论,爱因斯坦创立相对论,普朗克、波尔、海森堡等人创立量子力学,物理学取得了一系列重大进展,在推动其他自然学科发展的同时,也极大地提升了人类利用自然的能力。今天,物理学作为自然科学的基础学科之一,仍然在众多科学与工程领域的突破中、在交叉学科的前沿研究中发挥着重要的作用。

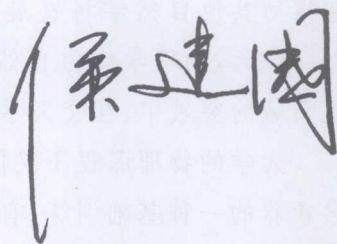
大学的物理课程不仅仅是物理知识的学习与掌握,更是提升学生科学素养的一种基础训练,有助于培养学生的逻辑思维和分析与解决问题的能力,而且这种思维和能力的训练,对学生一生的影响也是潜移默化的。中国科学技术大学始终坚持“基础宽厚实,专业精新活”的教育传统和培养特色,一直以来都把物理和数学作为最重要的通识课程。非物理专业的本科生在一二年级也要学习基础物理课程,注重在这种数理训练过程中培养学生的逻辑思维、批判意识与科学精神,这也是我校通识教育的主要内容。

结合我校的教育教学改革实践,我们组织编写了这套“中国科学技术大学交叉学科基础物理教程”丛书,将其定位为非物理专业的本科生物理教学用书,力求基本理论严谨、语言生动浅显,使老师好教、学生好学。丛书的特点有:从学生见到的问题入手,引导出科学的思维和实验,

再获得基本的规律,重在启发学生的兴趣;注意各块知识的纵向贯通和各门课程的横向联系,避免重复和遗漏,同时与前沿研究相结合,显示学科的发展和开放性;注重培养学生提出新问题、建立模型、解决问题、作合理近似的能力;尽量作好数学与物理的配合,物理上必需的数学内容而数学书上难以安排的部分,则在物理书中予以考虑安排等。

这套丛书的编者队伍汇集了中国科学技术大学一批老、中、青骨干教师,其中既有经验丰富的国家教学名师,也有年富力强的教学骨干,还有活跃在教学一线的青年教师,他们把自己对物理教学的热爱、感悟和心得都融入教材的字里行间。这套丛书从2010年9月立项启动,期间经过编委会多次研讨、广泛征求意见和反复修改完善。在丛书陆续出版之际,我谨向所有参与教材研讨和编写的同志,向所有关心和支持教材编写工作的朋友表示衷心的感谢。

教材是学校实践教育理念、达到教学培养目标的基础,好的教材是保证教学质量的第一环节。我们衷心地希望,这套倾注了编者的心血和汗水的教材,能得到广大师生的喜爱,并让更多的学生受益。



2014年1月于中国科学技术大学



前 言

普通物理中的热学显现着各种矛盾的对立与统一,冷与热、随机与必然、平衡与非平衡、可逆与不可逆,等等,是学生系统地从宏观和微观两个角度去认识物质世界的开始。有意思的是,对热学这门课的学习,也有“浅与易、深与难”两种截然不同之说。热学的基本原理乍看起来似乎很简单,有些甚至被认为是显而易见的;一些概念也是日常生活中的常用语,如温度、能量等;这些使一些初学者认为热学很容易学习,无需多大努力。但另一种说法是,这些原理博大而深邃,基本概念像熵、能量等又极为抽象,要弄清楚这些绝非易事。

同样,编好一本热学教材亦非易事。多年来,经过同行们不懈的努力,有大批优秀的热学教材问世。随着时代的发展,热学应用领域不断扩大,而且学科本身也有了許多重大发展,教科书也应适应这种变化,在传承中发展。作者在编写本书时,参看了很多热学教材和资料,书后附了一部分。编写过程中一些考量如下:

1. 尽管热学从创建至今已有数百年,但其基本原理、基本规律没有变化。在热学中,将物理概念、物理定律的渊源、精髓,以及物理思想清楚地表述,是教材的基本任务。在这方面,作者采用多种方式进行讲述,例如对一些重要的概念如热、能量等,从其发展的历史进程来理解,

对熵的概念,则从其多属性、多层次及其扩展外延来理解。

2. 在体系上,以热学理论为线索,以热学理论对不同物态的应用为内容,不再以单独章节来讲述固体和液体。强调热学理论的普适性,适用于一切固体、液体和气体;固、液、气三态的微观结构不同导致了它们的热性质差异。避免使初学者产生热学只是用来描述理想气体的印象。

3. 通俗、好懂,使学生真正感受到普通物理学的“普通”,这也是作者在编写过程中时刻提醒自己注意的。尽可能用通俗、口语化的语言进行描述、类比,不刻意追求严谨;尽可能引用生活或实践中与热运动有关的例子,使学生认识到热学理论源于生活 and 实践、就在我们身边。这些也反映在每一章的开头,每章都以前人在诗词中对热现象的描述来引出。进一步地,让同学们充分认识到热学理论与全球变暖、环境污染等当今社会发展中的重大问题的相关性,培养学生基本的物理素养。

4. 学习了经典统计的基本图像,若不了解量子统计会有点遗憾,尤其对那些可能不再继续学习后续课程(热力学与统计物理)的同学。因此,我们在第2章(《热运动统计规律》)的最后一节,简述了量子统计。这部分内容,只讲物理图像和思想,不涉及具体过程的演绎,力图使具有普通物理知识的学生能看懂,能对量子统计思想、量子统计对经典统计的过渡有所了解。

5. 普通物理学是物理学大厦的基石。温度向高、低端延伸,随之出现前沿的物理学研究领域——等离子体物理与低温物理。在本书的最后一章,我们从普通物理的视角对高、低温作些介绍。人们源于科学的基本兴趣及实际应用,在高、低温领域获得了巨大成就,对这些成就的物理本质的了解,能让学生开阔眼界,并认识到普通物理学的基础性地位以及物理学对推动社会科技进步的重要意义。

具体内容,除绪论外共有7章。绪论部分对热学的研究对象、理论体系和物理思想作阐述,以期初学者一开始就对热学概貌有所了解;第1章讲述温度,介绍温度的由来,如何定义、测量等,温度和物质聚集状态的关系等;第2章介绍热运动的微观理论;第3章介绍物质的热性质;第4章和第5章分别讨论热力学第一、第二定律;第6章介绍相变与潜热;第7章简单介绍非常规温度,作为对经典热学的补充。各章节打“*”号的



部分,在教学中可不选用,仅作为学生的阅读材料。

本书的基本框架经编委会多次讨论后确定。主编侯建国院士审阅了书稿,提出了有价值的指导性意见;副主编程福臻教授与作者进行了多次讨论,并逐字逐句对书稿进行了认真的修改;俞昌旋院士对第7章(《非常规温度》)提出了很好的建议;蒋一教授审阅了第2章,并提出了有价值的修改建议;在本书的前期准备阶段,张玉民教授、阮可青副教授与作者进行过有益的讨论,且张玉民教授还阅读了全书并提出了有价值的修改意见;编委会又邀请了清华大学的安宇教授和北京大学的穆良柱博士审阅了书稿,提出了珍贵的、有建设性的意见;理论物理专业的博士生王兆亮同学,我的研究生张一川、李唤同学编写了习题;中国科学技术大学出版社为本书的成稿和出版做了大量的工作。此外,在编写的过程中引用了大量的资料,有的直接来源于网络,如文章中的一些图片,无法在引用处一一注明,书后所附的参考书目也不完整,敬请读者谅解。在此对大家的帮助和支持一并致以衷心的感谢。

历时三年多,书终于脱稿了。由于作者水平有限,知识面有限,对课程的理解有限,书中肯定有不妥甚至错误之处,敬请各位老师、同学指正。大家共同努力,推动热学教学的改革与发展。

朱晓东

2014年3月于科大东区

目 录

序	(i)
前言	(iii)
绪论	(1)
0.1 热运动	(2)
0.2 热学的发展	(3)
0.3 热学的研究对象与方法	(4)
0.4 热学的理论体系与思想	(5)
第 1 章 温度	(7)
1.1 热力学系统的描述	(8)
1.1.1 热力学系统	(8)
1.1.2 热力学系统性质	(9)
1.1.3 热力学系统的状态	(10)
1.2 热力学第零定律	(12)
1.2.1 热平衡和热力学第零定律	(12)
1.2.2 温度	(13)
* 1.2.3 温度世界	(14)
1.3 温标及温度测量	(16)
1.3.1 经验温标	(16)
* 1.3.2 几种常用的温度计	(17)
1.3.3 理想气体温标	(21)
1.3.4 热力学温标及其他温标	(23)
1.4 不同温度下物质的聚集状态	(25)

1.4.1	固态	(25)
1.4.2	液态与气态	(27)
1.5	物态方程	(28)
1.5.1	一般情形	(28)
1.5.2	各向同性的固体与液体的状态方程	(29)
1.5.3	气体状态方程	(32)
第 2 章	热运动统计规律	(43)
2.1	物质的微观模型	(44)
2.1.1	原子-分子论	(44)
2.1.2	固体的微观特征	(47)
2.1.3	液体的微观特征	(50)
2.1.4	气体的微观特征	(53)
2.2	描述大数粒子的统计方法	(58)
2.2.1	决定论与概率论	(58)
2.2.2	概率与概率分布函数	(60)
2.2.3	统计平均值	(63)
2.2.4	涨落现象	(64)
2.3	理想气体的压强和温度	(65)
2.3.1	理想气体的微观模型	(66)
2.3.2	理想气体压强公式	(67)
2.3.3	温度的统计意义	(69)
2.4	范德瓦耳斯方程的微观图像	(72)
2.5	麦克斯韦分布律	(74)
2.5.1	速度空间与速度分布函数	(75)
2.5.2	麦克斯韦速度分布律	(76)
2.5.3	麦克斯韦速率分布律	(77)
2.5.4	麦克斯韦速率分布律的应用	(81)
* 2.5.5	麦克斯韦分布律的验证与推导	(85)
2.6	玻耳兹曼分布律	(89)
2.6.1	玻耳兹曼分布律	(89)
2.6.2	气体分子在重力场中按高度的分布	(90)
* 2.6.3	悬浮粒子按高度的分布	(91)
2.7	能量均分定理及应用	(92)



2.7.1	自由度	(92)
2.7.2	能量均分定理	(93)
2.7.3	理想气体的内能和热容	(95)
2.7.4	经典极限	(97)
* 2.8	经典统计对量子统计	(98)
2.8.1	宏观状态与微观状态	(98)
2.8.2	经典统计与量子统计对粒子微观状态的描述	(99)
2.8.3	经典统计与量子统计对系统微观状态的描述	(101)
2.8.4	量子统计向经典统计的过渡	(105)
附录 2.1	积分表	(108)
附录 2.2	误差函数简表	(108)
第 3 章	热与热传递	(109)
3.1	热	(110)
3.1.1	热相互作用	(110)
3.1.2	热的本质	(111)
3.1.3	热量	(112)
3.2	物质的热性质与分子热运动	(114)
3.2.1	物质热容量	(114)
3.2.2	黏滞现象	(117)
3.2.3	扩散现象	(121)
3.3	表面现象与分子力	(126)
3.3.1	界面与表面	(126)
3.3.2	液体的表面张力	(127)
3.3.3	润湿与毛细现象	(132)
* 3.3.4	固体表面的吸附现象	(134)
3.4	热传递	(136)
3.4.1	热传导	(136)
3.4.2	对流传热	(138)
3.4.3	辐射传热	(139)
* 3.5	传热与环境和生命现象	(142)
3.5.1	太阳对地球的辐射能流	(142)
3.5.2	大气环境中的热传递	(144)

3.5.3 传热与生命现象	(145)
第4章 热力学第一定律	(147)
4.1 热力学过程	(148)
4.1.1 一般的热力学过程	(148)
4.1.2 准静态过程	(148)
4.2 功与热	(150)
4.2.1 功相互作用	(150)
4.2.2 准静态过程的功	(151)
4.2.3 热功相当	(154)
4.3 热力学第一定律	(155)
4.3.1 能量守恒定律	(155)
4.3.2 内能	(157)
4.3.3 热力学第一定律的数学表述	(159)
4.4 热力学第一定律对 p - V 系统的应用	(161)
4.4.1 定容热容和内能	(161)
4.4.2 定压热容和焓	(161)
4.4.3 化学反应热	(162)
4.5 理想气体的热力学过程	(163)
4.5.1 焦耳实验	(163)
4.5.2 理想气体的内能和焓	(164)
4.5.3 理想气体的准静态过程	(166)
4.6 焦耳-汤姆孙效应	(173)
4.6.1 焦耳-汤姆孙实验	(173)
4.6.2 焦耳-汤姆孙效应的初步解释	(175)
4.7 循环过程与热机	(176)
4.7.1 循环过程	(176)
4.7.2 卡诺循环	(178)
* 4.7.3 热机	(180)
第5章 热力学第二定律	(187)
5.1 热力学第二定律的经典表述	(188)
5.1.1 热力学过程的方向性	(188)
5.1.2 热力学第二定律的经典表述	(190)
5.2 卡诺定理及其应用	(193)
5.2.1 卡诺定理	(193)
5.2.2 卡诺定理的应用	(195)
5.3 热力学温标	(197)



5.4 热力学第二定律的熵表述	(200)
5.4.1 克劳修斯不等式	(200)
5.4.2 熵	(203)
5.4.3 熵的计算	(205)
5.4.4 熵增加原理	(208)
5.5 熵的属性	(211)
5.5.1 熵与无序程度	(211)
* 5.5.2 熵与可用能量	(216)
* 5.5.3 熵与时间方向	(218)
* 5.6 热机与环境	(219)
5.6.1 热机的能流	(219)
5.6.2 热污染和空气污染	(221)
* 5.7 非平衡态与非平衡过程	(223)
5.7.1 近平衡的非平衡态	(223)
5.7.2 远离平衡的非平衡态系统	(225)
第6章 相变与潜热	(229)
6.1 相与相变	(230)
6.1.1 相与态	(230)
6.1.2 一级相变与潜热	(231)
6.1.3 相变的物理机制	(232)
6.2 气液相变	(233)
6.2.1 蒸发与凝结	(233)
6.2.2 沸腾	(236)
* 6.2.3 湿空气与湿度	(240)
6.3 固液及固气相变	(241)
6.3.1 固液相变	(241)
6.3.2 固气相变	(242)
6.4 相平衡	(243)
6.4.1 相平衡条件	(243)
6.4.2 相图	(245)
6.4.3 相平衡时的参量关系	(247)
* 6.5 临界现象	(251)
6.5.1 实际气体的等温线	(251)
6.5.2 临界状态	(252)
6.5.3 临界参数	(254)
第7章 非常规温度	(257)

* 7.1 低温与极低温的获得	(258)
7.1.1 低温获得	(258)
7.1.2 极低温的获得	(260)
* 7.2 热力学第三定律	(262)
7.2.1 绝对零度	(262)
7.2.2 零点问题	(264)
7.2.3 负温度	(265)
* 7.3 低温世界的奇异物性	(267)
7.3.1 超流现象	(267)
7.3.2 超导现象	(269)
7.3.3 低温世界色彩纷呈	(270)
* 7.4 高温条件下的物质	(271)
7.4.1 温度与等离子体	(271)
7.4.2 等离子体特有的性质	(273)
* 7.5 等离子体的温度与热力学态	(277)
7.5.1 等离子体的温度概念	(277)
7.5.2 等离子体的热力学态	(279)
7.5.3 等离子体分类	(280)
* 7.6 等离子体应用	(281)
7.6.1 高温等离子体聚变能应用	(281)
7.6.2 低温等离子体的应用	(285)
习题	(289)
部分习题参考答案	(310)
参考书目	(317)
附录 热学中常用的物理常量	(318)
常用概念中英文索引	(319)

绪论



热学这一门科学起源于人类对于热与冷现象本质的追求。由于在有史以前人类已经发明了火,我们可以想到,追求热与冷现象的本质的企图可能是人类最初对自然界法则的追求之一。

——摘自王竹溪先生的《热力学》

0.1 热 运 动



图 0.1 火的使用

1965年,我国考古工作者在云南发现了元谋人遗址,在地层中发掘到大量的炭屑。这表明,早在170万年前,元谋人可能就已经懂得火的使用。火的使用给人类带来了光明、文明,驱散了黑暗、愚昧,正因为如此,在许多民族的神话传说中,火被赋予某种特殊的意义。最有名的关于火的神话是希腊神话中普罗米修斯为人类盗取天火的故事,既颂扬了为人类造福者、追求光明与真理者的英雄精神,也体现了火在人类文明史上所处的重要地位,火象征着能量和力量。

我们还在襁褓之中就有了对冷热的本能反应。与冷热有关的现象统称为热现象。滴水成冰、骄阳似火、热胀冷缩、趁热打铁……,热现象是如此普遍。从时间跨度上看,热现象是人类史前就已认识的一种自然现象,人类从野蛮的原始社会进入文明社会,就是从火的利用开始的(图0.1)。在今天,从大型动力内燃机到我们日常煮饭的灶头,从食品制造到钢铁、化工生产,无一不与热现象有关(图0.2)。

当我们从物理学角度来审视热现象时,自然要问,这些纷杂的热现象是否有自身统一的规律?又如何来研究它?

我们已经学习了力学,知道了物体的机械运动及其遵循的规律。我们可以用牛顿定律来研究水珠在空气中下落、火箭在空间飞行等。在研究机械运动时,我们关注的对象是物体的整体运动。当我们把注意力转向物体内部,将会发现一个新的物理世界——一个由大量粒子组成的微观世界。

微观世界的基本特征是由大量粒子组成、粒子无规则运动及粒子间复杂的相互作用。最简单的例子就是我们所熟悉的空气。在 0°C 和1个大气压条件下,每立方厘米空气约有 10^{19} 个分子。单个分子极频繁地和其他分子碰撞,每秒约几十亿到近百亿次。气体分子运动的平均速率的数量级为 $10^2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。即平均地讲,气体分子以每秒数百米的速度运动着。尽管分子的速度相当大,但由于相互碰撞,分子的运动状态在不断地改变,表现为杂乱无章的、无规则的运动,如图0.3所示。



图 0.2 钢铁冶炼



图 0.3 分子热运动的微观图示

在标准状态下,分子的平均自由程约为 10^{-8} m ,单个分子极频繁地和其他分子碰撞,约每隔 10^{-10} s 就碰撞一次。



应该说,分子间力的相互作用是普遍的。对单个分子而言,其运动仍然属于机械运动,适用力学的基本概念,服从力学规律。但实际上,由于受其他分子的影响及复杂的相互作用,分子的具体运动具有很大的偶然性。对这群大数分子的运动情况,用牛顿力学来描述就无能为力了,重要的是我们将会发现也没这个必要。即是说,单个分子的运动遵循力学规律,大数分子的运动虽包含机械运动,但已经从量变到质变,不能归结为机械运动,而是一种更复杂、更高级的运动形式。因此,我们需要引入一个新的概念来描述它,这就是热运动。热运动所导致的宏观物理现象就是我们所熟悉的热现象。

我们把研究热运动、热现象的科学叫热物理学(热学),准确地说,热学是研究物质热现象规律以及热运动与其他运动形式相互转化规律的一门科学。它的基本概念、基本定律和基本理论,不但是物理学各分支学科的理论基础,也是化学、生物学、工程技术学科甚至社会科学的理论基础。

热运动也是生命体(人体、微生物、动植物……)存在于自然界所必须进行的的活动。同时,热运动和其他运动形式之间存在着极为广泛和深刻的联系。火车、轮船、火箭等动力装置就是利用热功转换来获得机械能的。随着科学技术的发展,热运动及其应用在科学研究以及人类生产活动中起着越来越重要的作用。

0.2 热学的发展

尽管人类在史前就有了对热现象的利用,然而对热现象进行研究、从而走上实验科学的道路,还只有三百多年的历史。伴随着热力学四个定律的发现,热学逐步建立起自己的理论体系。

1. 测温技术和量热技术

18世纪以前,人们对热的本质和温度的概念还只有一些不成熟的想法,甚至连“温度”与“热量”都难区分开来。自18世纪初开始,正是测温技术和量热技术的逐步建立使热学走上了定量科学的轨道。

2. 对热的本质的认识

在对热的本质的科学认识过程中,人们建立起热力学第一定律,这是热学理论发展的一个里程碑。从远古开始,人们一直在探究热到底是什么。代表性的有“热质说”,认为热是一种没有质量的流质——“热质”,可以从温度高的物体流向温度低的物体,但在传递过程中热质总量不变。与“热质说”相对立