

THE SPIRIT OF SCIENTIFIC EXPERIMENT

科学实验之光

优秀的实验家绝不仅仅是验证和推理的高手，
他们简直就是『实验室里的思想家』。



贺天平 等◎著



科学出版社

www.sciencep.com

教育部人文社会科学重点研究基地2007年度重大项目(批准号:07JJD720050)
山西省高校人文社科基地2008年度项目(批准号:20083003)

共同资助出版

科学实验之光

贺天平 桂起权 刘毅 唐超群 著

科学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

科学实验之光/贺天平等著. —北京: 科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-022483-5

I. 科… II. ①贺… III. 科学实验-普及读物

IV. N33-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 097122 号

责任编辑: 孔国平 郭勇斌 卜 新 / 责任校对: 赵燕珍

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 无极书装

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 14

印数: 1—3 000 字数: 243 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

关于这本书，还得从6年前说起。2002年10月下旬，我在浙江丽水召开全国科学基础转移问题研讨会，会上有幸遇到了武汉大学的桂起权教授。桂起权教授德高望重，学术态度严谨，记忆力非凡，是我一直敬仰的老前辈之一。这次会议给我提供了非常好的学习和交流的机会。科学实验是我们当时的一个话题，因为优秀的实验家绝不仅仅是一般人所说的操作能手，更是推理的高手，简直应当说是“实验室里的思想家”。解读科学实验正好是我们将科学史和科学哲学融为一体、实现哲学理念与科学史实例相结合的最好方法。这便成为我们撰写本书的主要动机和基本目标。

传统科学哲学以“理论占支配地位”为特征，而科学实验的实践转向则一反传统，提出“实验占支配地位”的新科学哲学，或“实验哲学”。新实验主义的代表人物哈金在其成名作《表征与介入》（1983）中发出新的号召，要求科学家在研究自然时，应该从被动地表征、反映自然转向积极地介入、干预自然，从理论转向实验。我们也非常赞赏哈金的实验哲学。哈金的基本立场是“实验实在论”，他的中心论题是：①实验有自己的生命；②实验是一种干预或介入，即新现象的生成。科学家所研究的现象，并不是“上帝”（大自然）写下来等待人们去发现的消极被动的东西，而是在实验中积极建构、创造的结果。我们注意到，马克思只是把人类出现之前的自然界的客观性当作不言而喻的事实，他更加关注的是由人类介入的、在历史实践中所建构的“人化自然”（见曹志平《马克思的科学哲学导论》）。

我们也同意拉图尔在《实验室生活》（1979，与伍尔加合著）中对于“自然事实”与“科学事实”的划分：朴素的“自然事实”是被揭示的，“科学事实”则是实验室建构的结果。但是，我们决不赞成社会建构论者们片面强调科学实验的社会要素，走向消极、极端的相对主义的做法，因为这样做就会取消了科学实验研究自然的本真内容。

那么，如何解读科学实验？我们认为，可以以科学哲学与科学史的观点作为

基本出发点，同时又兼顾科学社会学、科学伦理学、科学心理学乃至科学美学等因素，多视角、全方位地进行解读。

在本书中，我们也正是从这个基本点出发，立足于对现代科学技术的整体分析，聚焦于对“科学实验”的解读和反思。这里主要关注的是，用科学史与科学哲学的观点分析和透视科学实验，尤其是在人类思想史上对揭示物质世界或生命世界的内在奥秘至关重要的科学实验。这与实验科学家或工程师的工作不同。实验科学家或工程师对科学实验的具体操作、实验结果感兴趣，而我们更多强调这些科学实验背后的思想精华或方法论内涵。

本书采用双重标题手法，中间用冒号隔开。一般来说，标题的前一半点出了实验的具体内容，后半则表明其抽象的方法论意蕴。例如，在第一讲标题中，“焦耳实验”是具体内容，“伟大的运动基本定律的支柱”则是方法论概括。

第1讲之所以选择能量原理，是因为它在自然基本法则中最有代表性。我们之所以选择焦耳等实验，是因为在从实验提升到理论的过程中，精密的逻辑分析对实验内含深层意义的发掘具有不可忽视的作用。就这一点来说，它们最有典型性。

第2讲根据电磁学实验史上可靠的历史证据非常有说服力地表明，德国自然哲学关于多种自然力存在本质上的同一性的理念会导致许多学者在电磁学中得到一系列重大的实验发现。尤其是法拉第以自然力的转化为核心的理念和他那目标明确的、有计划的实验安排，使他能不断产生新成果，并能比其他实验家更深刻地理解自己的实验结果。

第3讲选取光学实验史中的典型材料，阐明了两个重要的实验方法论原理。一是牛顿从实验到理论原理的“分析与综合”程序，二是判决性实验的相对效力。就第一个原理而言，牛顿从色散实验提升出颜色理论，所采用的实验方法论是一个两步过程。先借助分析与归纳，从实验中得出解释性原理；再借助综合与演绎，从理论得出新推断，然后经受实验检验。第二个原理更复杂，也更重要。所谓判决性实验是指能对对立理论做出生死判决的实验，即能确证一方而否定另一方。然而，19世纪的实验家们一度将实验判决简单化并绝对化了，从而无法理解已被判了“死刑”的理论何以能重新复活。这就十分需要有迪昂的整体主义方法论理念来解围。当理论作为整体遭受实验反驳时，关键在于必须分清核心假说有错还是辅助假说有错，这正是我们在该讲中要细致分析的。

第4讲借助化学实验史上的经典案例揭示这样一个科学哲学真理，即在实验

中新事实的发现有赖于合适的新理论框架的发明。像普里斯特利那样敏锐的经验主义观察家与拉瓦锡那样善于深思的理性主义实验分析家对化学的实验与理论都做出了各自不同的贡献。“科学事实”是优秀的实验家建构的结果。

第5讲借助于青霉素与X射线的案例,说明了在实验发现中偶然性与必然性的辩证关联,揭示了“机遇只垂青于有准备的头脑”这样一种真理。

第6讲借助从伽利略到爱因斯坦的一系列著名理想实验,说明了这种独特的方法论工具在揭示旧理论危机和发现重大新原理过程中的关键性作用。理想实验是一把“思想的铲子”,具有挖掘埋藏得很深的、早已得到公认却是有毛病的背景知识(“共识”)中的“悖理”(Paradox)的独特功能,从而化解矛盾创造条件。

第7讲借助孟德尔豌豆实验和摩尔根学派的果蝇实验研究等背景材料,阐明了这样一个实验方法论原理:面对在科学实验中不断出现的新的反常,实验家为了维护核心假说,应当不断引进新的可以独立检验的辅助假说,一个接一个地成功消解反常事实。同时表明,真正的实验大师不只是动手能力特强的操作能手,还是善于运用假说演绎法的高手。

第8讲讲实验美,介绍科学美学及技术美学在实验评价中的运用。

第9讲以卡文迪许实验室和果蝇实验室为案例阐明了科学共同体的理念。它表明,每个学派都有自己共同的研究纲领、范式和方法论特征,以领袖为核心的精英人物各有自己的心理特点、研究风格与独特贡献。

在科学思想史的背景材料铺垫下,第1~7讲主要是对科学实验所做的科学哲学、科学方法论进行分析。对于同一个科学史事实,我们至少参照五种背景资料,反复比照,才决定取舍。例如,关于摩尔根实验室出现的第一个白眼突变果蝇的日期,有三种不同说法:1910年1月5日前、3月、5月。我们之所以采取摩尔根夫人的说法,是因为由母亲记自己孩子的生日,应当认为是最可靠的参照系。第8讲已转向科学美学,第9讲则从科学哲学拓展到科学活动的社会与心理因素。

第10~12讲所讨论的主要是心理学实验(但巴甫洛夫实验首先是作为生理学实验而出现的),这是在科学实验中非常独特、饶有趣味和不可忽视的一个领域。一般读者,包括从事物理实验、化学实验的学者,并不熟悉心理学实验,甚至遗传学家也未必熟悉它。因此,在这一部分我们对实验细节的描述要比其他各讲更具体。读者不难看出,这些实验对于揭示人类认知过程的特点、揭示人类心

灵世界的奥秘极富启发价值。由于心理学实验在研究方法上具有与一般的理化或生物学实验都不相同的全新特点，因此在方法论上也给实验家们带来新的启示。第12讲借助于构思巧妙的一些实验设计，揭示了社会心理学的一些基本原理，并涉及科学伦理学的研究领域。

第13讲用精确的科学语言向读者表明，借助现代实验技术，人类肉身以外的“眼睛”与“手”已经可以延伸到原子内部，即进行所谓微观观察与微观操纵，这显示出现代科学实验的巨大威力。这对哲学学者们抽象的科学哲学分析来说，无疑是一种引人入胜的重要补充。

希望本书能为从事科学哲学、科学史研究的人员和科学爱好者提供很好的精神食粮，这是我们最大的荣幸。

贺天平

2008年9月10日

目 录

前言

第1讲 焦耳实验：伟大的运动基本定律的支柱 / 1

第2讲 电磁实验：自然哲学的启示 / 15

第3讲 光：判决性实验究竟说明了什么？ / 34

第4讲 氧：事实发现与理论发明 / 52

第5讲 青霉素和 X 射线：科学实验的偶然发现 / 71

第6讲 理想实验：特殊的科学实验 / 83

第7讲 经典遗传实验：纲领方法论分析 / 103

第8讲 科学实验：美的艺术缔造 / 120

第9讲 卡文迪许实验室和果蝇实验室：科学共同体 / 135

第10讲 心理实验室：科学心理学的诞生标志 / 148

第11讲 学习实验：多角度认识问题 / 168

第12讲 科学实验中的伦理道德问题 / 181

第13讲 显微实验：技术对科学的作用 / 193

人名索引 / 210

后记 / 215

第 1 讲

焦耳实验：伟大的运动基本定律的支柱

- 从仑福特、戴维的摩擦生热实验到焦耳的热功当量实验
- 开尔文、克劳修斯对焦耳实验的逻辑分析
- 自然哲学思想对能量原理的启示

自然界许多基本法则的发现与确立是与重大科学实验的支撑分不开的，同时又与自然哲学思想的启示以及精细严密的逻辑分析相关。这是自下而上（从实验事实上升到科学理论）与自上而下（从哲学与逻辑分析下行到实验事实）两套思路结合的结果。

每一个学过科学的人都知道能量守恒与转化定律，也叫热力学第一定律。在热力学中除了有体现能量不灭的第一定律之外，还有体现能量耗散的第二定律。著名的焦耳测定热功当量的实验对热力学中这两个能量原理的确立，具有不可磨灭的贡献。然而，焦耳实验对两个定律或原理的具体贡献与作用却是很不相同的。

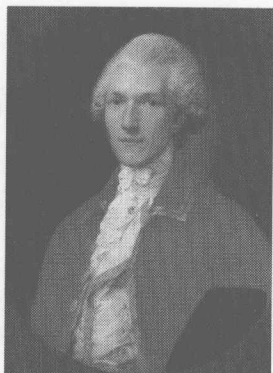
能量守恒与转化定律的发现有两大来源：一是焦耳的精确的定量研究为“能量不灭”提供了牢固的实验基础，二是自然哲学所做的抽象概括更能体现普遍规律的性质。两者是相互补充的。这样，焦耳实验对第一原理的贡献是明显的。另一方面，焦耳实验对第二原理也间接做出了贡献，因为焦耳实验对剥离并消除卡诺热机理论的错误成分（热质说），从而澄清并显示热力学第二原理真正的理论前提起了决定性作用。要认清这一点，必须依靠精密的逻辑分析。

总体来说，能量原理的发现是人类思想史上的一件大事，恩格斯曾高度评价过能量不灭原理，并称之为伟大的运动基本定律。将自然界各级运动形态的不同质的现象加以统一起来把握的倾向，导致能量理论的建立。人们在认知能量原理的发展道路上的主要障碍之一是“热质”（拉瓦锡称为 Calorique，即卡路里，一

种不可称量的流体)，焦耳实验对扫清发展道路上的障碍并确立能量原理起到了关键性的作用。

—

关于热的本质在科学史上有过两种对立的学说，一种是热质说，认为一个物体所包含的热质越丰富，则所能产生的热量也就越多，这种学说得到了绝大多数人的拥护；另一种是热的运动说。热的运动说有两位先驱者——弗朗西斯·培根和伽桑狄，但是他们关于微粒热运动的哲学思考并没有使热质说拥护者动摇。然而，仑福特、戴维的著名实验却给热质说以致命的打击。

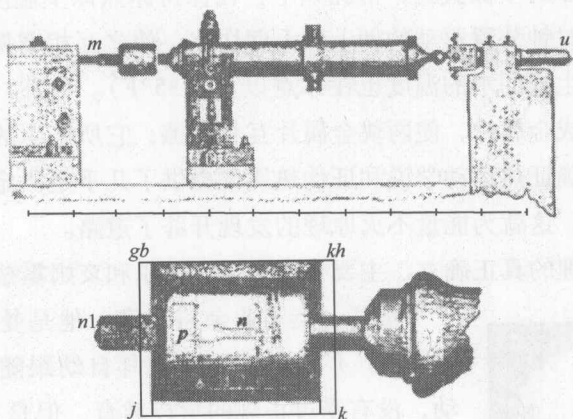


仑福特伯爵

仑福特伯爵，原来是美国独立战争时期的军人（他站在英国那一边），后来担任了德国军部大臣，在慕尼黑兵工厂监制大炮。在此期间他做出了重要的发现，提出热是所做的机械功产生出来的。他是在1778~1781年研究火药性能时开始主张热运动学说的。他发现：如果不填入弹丸而使火药爆发，炮身要比填入弹丸而爆发时热得多。他猜想，这个结果应当用火药爆发引起炮身内部的金属微粒急剧运动而产生的热来解释。他在慕尼黑时惊奇地发现，兵工厂在镗削大炮时，炮身在短时间内就能变得相当热，特别是镗削金属的量并不与发热的量成正比，用几乎不能进行切

削的钝钻头操作，凭借摩擦照样不断地产生大量的热来。他将金属柱及镗削装置全部浸在水中进行镗削。果然，只要不停地操作，热就无限制地不断产生出来，直至最后使得大量的水沸腾起来。而孤立物体绝不可能源源不断地而且没有限制地提供热的物质“热质”。仑福特认为，这个反常事实对于证伪热质说有足够的说服力。热因此不可能是物质实体，而只能是一种运动。仑福特的摩擦生热实验是在1796年和1797年进行的。1798年，他向皇家学会写了报告《关于摩擦生热的研究》。

仑福特的报告引起了巨大的反响，但大部分人都反对他的设想。当时与仑福特的观点不谋而合的，大概只有戴维和托马斯·杨。



伦福特的摩擦生热实验

上为大炮钻孔实验，下为水箱实验

戴维，英国化学家，1778年12月17日生于英格兰彭赞斯，1829年5月29日卒于瑞士日内瓦，是一位雕刻匠的儿子。1795~1798年给一位外科医生兼药剂师当学徒，其间读了拉瓦锡的《化学原理》，对化学产生了兴趣。1798~1801年，受人推荐任气体研究所化学实验的负责人，调查各种气体的医疗作用。戴维以巨大的热情投入该工作，表现出高超的实验才能。1799年他发表了第一篇论文，他独立于伦福特提出了“热是一种运动”的结论。他研究氮的氧化物和含氮酸的组成，并将研究成果汇总成《化学与哲学研究》一书，该书于1800年出版，这是他的成名作。

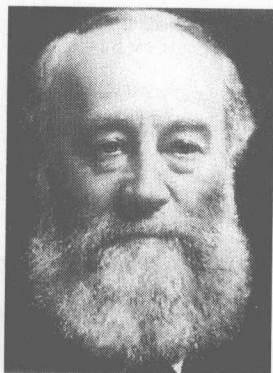


戴维

在气体研究所，戴维通过他的朋友科尔里奇接触到康德哲学，受到康德哲学的强烈影响。康德认为，物质的本性和实在性（即“物自体”）是不可知的，不是人类知觉所能把握的对象，唯有物质之间的力（如引力与斥力）才是现象世界的可感知部分。在这种思想的指引下，戴维对热质（卡路里）这种“不可称量流体”持怀疑态度，认为它是没有必要存在的空洞概念，从而转向以物质之间相互作用的视角来考察热现象。1801年他在英国皇家学院讲授化学；1802年任化学教授和皇家学会会志助理编辑；1803年当选为英国皇家学会会员，1820年任主席。

戴维所做的冰的摩擦实验，情况如下：在保持冰点以下温度（29°F^①）的玻璃容器中，在用时钟装置驱动的柄上装上两块冰，使之互相摩擦。结果，不但冰融化了，而且所生成的水的温度也在冰点以上（35°F）。另外，将上述容器用冰围起来，冰块换成金属片，使两块金属片互相摩擦，它所产生的热也可以使蜡熔化。这些实验为确证热运动学说和证伪热质说提供了几乎是决定性的证据。热质说从此一蹶不振，这就为能量不灭原理的发现开辟了道路。

能量不灭原理的真正确立，主要是由焦耳、迈尔和亥姆霍兹完成的。



焦耳

焦耳，英国业余科学家，他是曼彻斯特附近一家大啤酒厂厂主的次子。焦耳自幼跟随父亲参加酿酒劳动，没有受过正规的学校教育，但是在1835年时，著名的科学家道尔顿却当过焦耳的辅导教师。道尔顿给予了焦耳认真而耐心的指导，向他传授数学、物理和化学等方面的知识，为焦耳后来的研究奠定了理论基础。尤其是道尔顿所倡导的理论与实验相结合的科研方法，给焦耳带来了无穷的启示，并使他终身受益。英国是富于经验主义哲学传统的国家，与此不同，德国则是富于思辨哲学传统的国家。每个科学家都脱离不了自己所处的社会历史背景，都深受所属的文化共

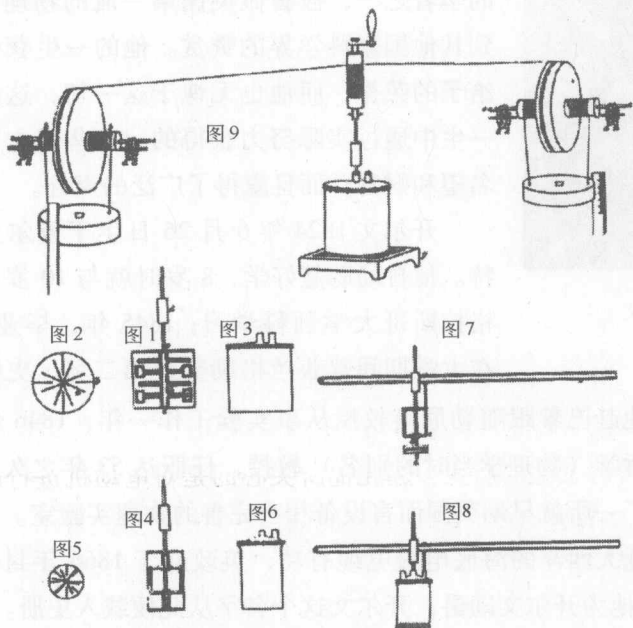
同体的影响。焦耳也不例外，他终身爱好实验，是典型的经验主义的实验科学家，鄙视德国学者迈尔所做的思辨的自然哲学思考。

焦耳关于热功当量测定的系列实验，为能量不灭原理奠定了坚实的实验基础。焦耳从19岁开始他的研究，起先他所关心的是对电动机进行改进，以提高效率。虽然未达到预定目标，却注意到电机与电路中的发热现象，由此他就转向对电流的热效应进行定量研究。1840年12月，他通过实验定量地测出了电流通过电阻线所放出的热量，发现了现在人们所熟知的焦耳定律（ $Q = I^2 R t$ ）。据此，他写成两篇论文《论伏特电所生的热》与《电解时电池组中放出的热》。初步的成功，使焦耳兴趣倍增。

接着，1841年至1843年初，焦耳又做了一系列实验，试图定量地研究热能与化学能之间的转换关系，一时未取得成功。于是，焦耳就改变方式，不再采用

^① 1华氏度 = 5/9 开

电池，而是考虑利用机械方法产生的感应电流来进行研究。他设计了一个简易发电机，并用它做了一个这样的实验：让发电机的电枢在一电磁体两极间高速转动，用电流计测量其感应电流，又将电枢放进盛水的密闭的量热器以测定水温的升高。从实验过程中，焦耳领悟到机械功与热之间的相互转化，于是确定热功当量的值就提到议事日程中来了。在实验中也就是要确定使电枢转动所消耗的机械功与所产生的热之间的定量关系。焦耳的办法是：在电枢的轴上绕两根细线，跨过两个挂了一定重量砝码的滑轮，由砝码的重量及下落的距离可以算出所做的功。焦耳一共做了 13 组实验，得出一个平均结果，若用现代通常单位来表示，他所测量的热功当量大约为 $460 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{千卡}^{\text{①}}$ ，这是第一个可靠的热功当量值。这个结果总结在焦耳于 1843 年 8 月宣读的论文《论磁电的热效应与热的机械值》之中，可惜当时并未及时引起人们的关注。直到 1847 年 8 月在英国科学



焦耳的叶轮装置

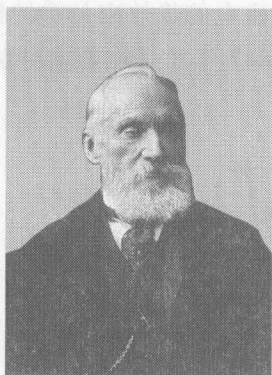
焦耳利用这一装置建立了热功当量关系。图 1 和图 2 分别为铜质叶轮的水平和垂直方向的剖面图，图 3 是盛满水的铜质容器，图 4 ~ 图 6 是改进后的装置，图 7、图 8 是固体摩擦生热的装置，图 9 为整个装置运作情况

① $1 \text{ 卡} = 4.1868 \text{ 焦}$

振兴学会的年会上，开尔文对焦耳的热功当量实验与功热转化的观点表示热烈支持并开展了讨论，焦耳实验才首次引人注目。

焦耳在 1850 年所写的《论热功当量》的论文中进一步总结了以往的成果，这才给出了几乎所有现代物理教科书都要描述的经典实验——焦耳的叶轮装置：在铜质量热气内装有带叶轮的轴，叶片分布在彼此成 45° 的垂直平面内。在轴的外端的小圆柱上绕上细绳，细绳通过定滑轮而吊以重物，如此等等。

二



开尔文

焦耳实验引起了开尔文的深思。

开尔文是英国著名物理学家。他是 19 世纪最伟大的学者之一，被看做英国第一流的物理学家，同时受到其他国家科学界的赞赏。他的一生获得了一切可能给予的荣誉，而他也无愧于这一切，这是他在漫长的一生中通过实际努力获得的。这些努力使他不仅有了名望和财富，而且赢得了广泛的声誉。

开尔文 1824 年 6 月 26 日生于爱尔兰的贝尔法斯特。他自幼聪慧好学，8 岁时就与 10 岁的哥哥一起进格拉斯哥大学预科学习；1845 年，毕业于剑桥大学，在大学期间曾获兰格勒奖金第二名，史密斯奖金第一名。毕业后，他赴巴黎跟随勒尼奥教授从事实验工作一年，1846 年受聘为格拉斯哥大学自然哲学（物理学当时的别名）教授，任职达 53 年之久，他在格拉斯哥组织并创建了一所就早期英国而言设备相当完善的物理实验室。由于开尔文对铺设第一条横越大西洋的海底电报电缆有功，英政府于 1866 年封他为爵士，并于 1892 年晋升他为开尔文勋爵，开尔文这个名字从此便载入史册。

开尔文研究范围广泛，在许多科学领域都做出了贡献。他对科学的主要贡献有：参与发现热力学第一与第二定律，为热力学奠基；建立绝对温标（即开尔文温标）；提出电磁理论的数学分析方法和相关基本概念。因而，他在当时科学界享有极高的名望，受到英国本国和欧美各国科学家、科学团体的推崇。

开尔文察觉到，焦耳实验与卡诺的理论似乎不太协调。

卡诺于 1796 年 6 月 1 日生在巴黎。他的父亲拉扎尔是拿破仑手下有名的将

军、五人执政团成员，被称为法国大革命中“胜利的组织家”，曾经发表过关于军事战略方面的论文。父亲在数学、物理方面也有很高的造诣，曾专心研究过“最高效率的机器的普遍理论”。卡诺自幼受父亲的熏陶，特别是在1807年父亲退出政界、军界以后，便把自己的全部精力都倾注在儿子的学业上，因此卡诺进步非常快。

1812年，16岁的卡诺考入了法国十分著名的巴黎理工大学。它是19世纪法国高等教育和科学研究的中心，成果累累、人才辈出。法国许多著名的科学家都是这所学校培养出来的，或者在这里教过书。卡诺在这里打下了良好的基础。1814年10月，卡诺从该校毕业后当了几年军事工程师。随着拿破仑的下台、政治环境的变化，1820年卡诺回到巴黎，专心进行研究。卡诺先后在巴黎大学、法兰西学院、矿业学院和巴黎国立工艺博物馆学习物理学、数学和政治经济学。这样，他的理论基础更加雄厚了。1824年出版的一本杰



卡诺

作《论火的动力》，是他唯一的论著。其中确立了考虑到理想循环的卡诺定理，解决了评判热机效率的普遍标准。这位博学多才的人物创造了理想热机的理论，奠定了热力学发展的基础。

焦耳热功当量实验引起开尔文的密切关注，同时他不得不对卡诺理论做进一步的深入思考。因为，卡诺关于理想热机在做功过程中热量守恒（也就是热量不消耗）的论断，与焦耳的只要热机对外做功就有热量消耗，这两者存在明显的矛盾。那么，矛盾的根源在哪里呢？焦耳和卡诺的理论孰是孰非？焦耳的成果以确凿的实验为依据，相对而言，卡诺理想热机理论以严密的数学推理为基础，但同时引进了某种隐蔽假说。所以，开尔文首先开始怀疑卡诺理论。当时学术界已经普遍接受了卡诺理论，那么卡诺理论在哪里出现了问题呢？开尔文认识到，人们对卡诺理论的认同主要是针对理想热机效率定理的，尽管结论不错，然而得出这个结论的推理过程却是值得推敲的。

卡诺讨论的基础是“热质守恒”和“永动机不可能”这两个假说。热流与水流的类比在卡诺的发现中成为重要的启发性原则，整个设想相当于一个理想实验。卡诺以水车为模型来研究热机，根据水的动力与水位的落差成正比，类推热的动力与温度差成正比。在整个过程中，水车的水量并没有损失。在这里，卡诺

暗中采用了热质说的立场。然而，重要的是，他指出了热机效率与温度差之间的正确关系，他的结论是：在理想热机中，不管采取什么工作物质，同样数量的热量转移会产生同样数量的“动力”（即相当于功）。这一动力的量仅由高温热源与低温热源的温差所决定。卡诺关于热机必定涉及两个热源的思想是以后热力学“第二定律”的渊源之一。

由于在卡诺的假说中，“热量守恒”是建立在热质说的基础上的，而热质是一种不可称量的流体，因而是十分可疑的。开尔文看出卡诺的热机在做功过程中“热量守恒”的假说同焦耳的做功必须消耗热量两者是相矛盾的，因而对卡诺的热质说假说本身提出了质疑。开尔文对困扰热力学理论的概念危机的认识是相当深刻的。

除开尔文之外，还有一位物理学家对这个危机也有深刻认识，也就是对卡诺理论和焦耳由实验所引出的结论之间的矛盾有所洞察，这位伟大的物理学家就是克劳修斯。

克劳修斯，德国伟大的物理学家，26岁时在柏林大学取得博士学位。先后担任柏林皇家炮兵工程学校、苏黎世大学与波恩大学教授。“熵”的概念的引入者，1854年在正式命名前就提出了熵的分析表达式，又在1865年明确为孤立系统的“熵增加原理”，从而为热力学奠定了基础。



克劳修斯

克劳修斯也非常重视焦耳实验，他在1850年发表的“论热的动力”的重要论文中认为，焦耳的实验已经充分证明热与任何机械功是等价的，但它同卡诺的热机在做功过程中热量不会损失的论断是明显矛盾的。不过，克劳修斯认为“矛盾”是可以消解的。怎么消解呢？问题在于卡诺的“热量守恒”与焦耳的“热量耗散”实质上并不相互排斥。克劳修斯写道：“很可能在做功的过程中，有一部分热量消耗掉了，还有一部分热量从高温物体传到了低温物体，这两部分都同所做功的量存在着某种明确的数量关系。”也就是说，他的结论是：卡诺理论的实质内容应当是当循环过程对

外做功时就有热量从高温物体流向低温物体，因此，没有必要在焦耳理论和卡诺理论之间做非此即彼的选择。形象地说，克劳修斯为卡诺理论抛弃了多余的附加假说即热质说，而使它能够轻装前进。

根据克劳修斯对卡诺理论的修正结果，热机中的热量从高温库流向低温库，但并不是全部热量都转变为机械功。这个结论不仅升华了卡诺的理想实验与焦耳的实际实验结果，同时也启发克劳修斯独立地确立了热力学第二定律（1850，克劳修斯形式），即：

没有某种动力的消耗或没有残存的变化，就不可能使热从低温转移到高温物体。

按照开尔文的看法，有一部分热量（即能量）耗散了，耗散意味着无法恢复、无法观测。当然，耗散并不意味着热量或能量的毁灭。对于开尔文而言，能量的不可毁灭性和能量耗散性都应当看做热力学的基本机理。只讲能量不灭还不够，必须补充可用能量的耗散。当然耗散的能量并未毁灭，只是无法恢复而已，因此这两个原理实际上是可以相互协调的，也就是说二者是不矛盾的。不过，开尔文的能量耗散原理毕竟表明能量浪费掉了，当然并非毁灭了。所以，继克劳修斯之后，开尔文于 1851 年也独立地提出了热力学第二定律的另外一种形式：

靠无生命物质的作用，不可能把某一物体冷却到它周围最冷物体的温度之下，以产生机械功。

这样一来，能量的不可毁灭性和能量的耗散性分别被科学家概括为热力学第一定律和热力学第二定律。

三

需要补充的是，像能量守恒定律那样总括性的思想，实际上难以从个别的事实发现和技术经验的积累中，归纳地推导出来。在一般情况下，把各种事实在某一统一的观点之下相互联系起来的想法，如果不是在相当明确的思想背景下是很难实现的。对于能量守恒定律来说，18 世纪末到 19 世纪初流行的自然哲学正好提供了这种背景。

德国自然哲学家把整个宇宙看做由某种根本性力量而引起的历史发展的产物。他们认为各种自然力如热、电、磁、光、化学亲和力等在本质上都是同一的。在能量原理的发现者中，有些人正是以这种哲学性思考作为研究的立足点的，特别是偏爱思辨的德国学者，如迈尔。

迈尔在 1814 年 11 月 25 日生于德国海尔布隆，是一个药剂师的儿子。自幼