

电子图书



信息技术的结晶

人类文明的载体

网络的基本资源

无规世界出奥妙 热学的故事

热现象与热运动

什么是热？

人类在原始时代就学会用火，接触到了热现象。关于热是什么的问题，很早就成为人们探讨的对象，形成两种截然相反的见解。

一种见解把热看成是自然界的特殊物质。我国殷朝形成的“五行说”，把热（火）看做和金、木、水、土一样的东西，是构成宇宙万物的物质元素。在古希腊产生的物质元素论中，也把热（火）看做是一种独立的物质元素，赫拉克利特认为，世界就是火。

另一种见解把热看成是物质粒子运动的表现，我国古代朴素唯物主义思想家提出的“元气论”，就认为热（火）是物质元气聚散变化的表现。在古希腊和古罗马，也有一些学者，特别是原子论者，把冷热看成是物质微粒（原子）在虚空中运动的一种表现。卢克莱修就曾经说过，运动可以使一切东西都变得很热，甚至燃烧起来。

不过，在科学不发达的古代，这两种见解都只是直觉的猜测。

在漫长的中世纪，热学几乎毫无进展。直到17世纪以后，一些著名科学家根据摩擦生热的现象，恢复了古人关于热是物质粒子的特殊运动的猜测，比如，英国的培根就曾说过，热是一种运动。法国的笛卡儿更把热看成是物质粒子的一种旋转运动。当时，牛顿、胡克、罗蒙诺索夫等人都相信和支持热是运动的观点。但是由于没有充分可靠的实验依据，这种正确的观点还没有形成系统的理论，更没有赢得学术界的普遍承认。

到了18世纪，人们对热的本质的认识，奇怪地走上了一条弯曲的道路，复活了古人把热看成是特殊物质的错误猜测。英国的布拉克提出了系统的“热质说”，又叫做“热素说”。他认为热是一种看不见、没有重量的流质，叫做热质。热质可以渗透在一切物体之中，物体的冷热取决于它所含热质的多少。热质可以从比较热的物体流到比较冷的物体，就像水从高处流向低处一样。自然界存在的热质数量是一定的，它既不能创造，也不会消灭。

热质说能够顺利地解释许多人所共知的热现象。比如，说物体受热膨胀是热质流入物体的结果，热传导是热质的流动，对流是载有热质的物质的流动，太阳光经过凸透镜聚焦生热是热质集中的结果，等等。因此它压倒了热是运动的观点，获得了广泛的承认。1789年，法国的拉瓦锡把热列入他的化学元素表里，用T表示，属于气体元素类，物理学中常用的热量概念和它的单位卡路里（简称卡），也是在热质说的基础上建立的。当时，热量就表示热质的多少。

热质说取得胜利，成为热力学的正统理论后，仍旧不时受到一些新的实验事实的冲击。比如在冰溶解成水和水沸腾变成蒸汽的过程中，只吸收热量，温度并不升高的事实，就向热质说提出挑战，按照热质说，物质含的热质越多，温度应该越高。给冰加热，就是把热质注入到冰里去，所以冰的温度应该逐渐升高。然而冰溶解的时候，尽管每1千克冰吸收了80千卡热，冰的温度没有升高，同样，水沸腾的时候，每1千克水虽然吸收了539千卡的热，水的温度也没有升高，冰或者水吸收的热质跑到哪里去了呢？

还是布拉克提出了一种“巧妙”的解释，说这些热质“束缚”到物质内部去了，或者说“潜伏”起来了。他把这部分热质叫做“潜热”。虽然这种

解释不能叫人满意，但是也能搪塞过去。就这样，热质说在热学中称雄了近一百年。

热质说究竟是不是真理呢？只有科学实验才能做出权威的判断。

1798年，从美国移居欧洲的科学家汤姆生，后来被封为伦福德伯爵，在用钻头钻炮筒的时候看到，钻头、炮筒和铁屑的温度都升高了，而且产生的热量和钻磨量或多或少成反比。他发现，钝钻头比锐利的钻头能够给出更多的热，但是切削反而少了。这和热质说的观点是矛盾的。根据热质说，锐利的钻头应当更有效地磨削炮筒的金属，放出更多的和金属结合的热质。伦福德还用一只几乎不能切削的钝钻头，在2小时45分钟里使大约8千克的水达到了沸点。实验使伦福德得到了“热是由运动产生的，它决不是一种物质”的正确结论。

热质说的维护者人多势众，对伦福德的发现进行了种种刁难和歪曲，讥笑他违反“常识”。他们说，钻炮时候的热是其他化学变化产生出来的。伦福德经过仔细检查，没有发现在钻孔过程中有任何东西发生了化学变化。热质说的维护者们又声称，热是由于钻头把组成炮筒的金属中的“潜热”钻出来了。伦福德又经过反复检验，没有发现金属发生了从液态到固态或者从气态到液态的转变。因此“钻出了潜热”的说法纯属胡扯。极力维护热质说的人又说什么这是由于金属的比热发生了变化。在激烈的唇枪舌剑中，虽然热质说理屈词穷，但仍不甘失败，最后宣称热是由“外面的热质跑进来的”，千方百计把新发现纳入自己的框框。

为了驳倒热质说，1799年，戴维做了冰的摩擦实验。他在真空中用一只钟表机件使两块冰相互摩擦，整个实验仪器的温度正好是冰的冰点温度。实验结果，两块冰在摩擦的地方不断溶解成水。大家知道，水的比热比冰的比热还要大。这个实验驳倒了“外边的热质跑进来的”谬论，也证明了所谓热质不生不灭的守恒定律是错误的。根据确凿的实验事实，戴维大胆否定了热质的存在，认为热是一种特殊的运动，可能是各个物体的许多粒子的一种振动。

做功能够产生热，消耗热也能做功，功和热之间有没有确定的关系呢？为了寻找这个关系，就是测定所谓热功当量，英国酿酒匠出身的物理学家焦耳，从22岁开始，花了近40年时间，一共做了400多次实验，他历尽艰难，遭受过压制，终于创建了辉煌业绩。

在19世纪40年代头几年，默默无闻的焦耳埋头实验，用不同的方法初步测出了热和功之间的数量关系，指出只要做了一定数量的机械功，总能得到和这个功相应的热。这个新人耳目的发现，在科学界引起轰动，有的赞同，但更多的是遭到怀疑和反对，甚至无理地拒绝他在皇家学会宣读实验论文。

焦耳不畏困难，决心继续实验，用更精确的实验来驳倒反对派。1847年，他精心设计了一个迄今认为是最好的实验，就是在下降重物的作用下，使转动着的叶片和水发生摩擦而产生热。焦耳坚信，自己的实验结论是正确的。

在这一年六月举行的英国学术会议上，焦耳要求宣读论文，又遭到阻拦，他费了一番口舌，才被同意做简要介绍。然而，他的介绍遭到信奉热质说的科学权威汤姆生等的强烈反对，连法拉第也表示怀疑。

直到50年代，由于其他国家的科学家从不同角度也得出了热功当量的数量，焦耳的成就才得到普遍承认，他本人也被选为英国皇学会会员。

1878年，年已花甲的焦耳对热功当量做了最后一次测定，得到的结果是

423.9 千克米/千卡，和三十年前的测定结果相差极小。为了纪念他，人们用他名字的第一个大写母 J 来表示热功当量， $J=427$ 千克米/千卡。意思是，1 千卡的热量和 427 千克米的功相当，假如功用焦耳做单位，热量用卡做单位， $J=4.18$ 焦/卡。

热功当量的测得，标志着热质说被彻底摧毁，热的运动说取得完全胜利，也导致了自然界的一条普遍规律——能量守恒和转化定律的建立。

通过长期反复较量，在实践中经受了考验的热的运动说终于赢得了胜利。

热的运动说指出，热量是物质运动的一种表现。它的本质就是物质内部大量实物粒子——分子、原子、电子等的杂乱无规则运动。这种热运动越剧烈，由这些粒子组成的物体就越热，它的温度也越高。物质的运动总是和能量联系在一起的。实物粒子的热运动所具有的能量，叫做热能。热运动越剧烈，它所具有的热能也越大。所以，温度其实就是无数粒子的热运动平均能量的量度。

19 世纪中叶以后，热力学的理论和实践都取得了突飞猛进的发展。

物质由分子组成

两千多年以前，我国古代的学者提出了“一尺之棰，日取其半，万世不竭”的论断。“棰”是一种策马鞭上的短木棍。意思是，一尺长的短木棍，每天分割一半，就是亿万年也分割不完。它朴素地说出了物质无限可分的思想。但是，对于木棍这样的具体物质进行机械分割，是不可能“万世不竭”的。

比如你“日取其半”地分割一尺长的木棍，分割到第 29 天，剩下的长度大约是五亿分之一尺，它还具有木头的性质。因为木头是由一种纤维素的单元构成的，这是一种很长的链，每个环节大约是五亿分之一尺，和第 29 天分割以后剩下的长度相当。但是经过第 30 天分割；剩下的长度只有十亿分之一尺，变成了比组成木头的纤维素单元更小的东西。在第 30 天以后，虽然物质还可以无止境地分下去，但是分出来的小粒子已经不再具有木头的性质了。可见，具体物质的分割是有限度的。

在物理学中，能够保留某种物质性质的最小粒子，叫做这种物质的分子。自然界里千姿百态的物质，都是由各种各样不同的分子组成的。

分子的尺寸和重量都小得惊人。一滴油滴到水面上，可以散成很大面积，油层可以薄到只有百万分之一厘米；延展性很好的金子，可以加工成厚度只有十万分之一厘米的金箔。但是这样薄的油层还有几十个油分子厚，这样薄的金箔竟有几百个金分子厚。

精确的实验告诉我们，一般物质分子的直径，大约只有亿分之几厘米。在物理学中，常把亿分之一厘米叫做 1 埃。象水分子的直径是亿分之四厘米，就是 4 埃。这是一个很小的数字，把 2500 万个水分子肩并肩地排列起来，总长度才是 1 厘米。蛋白质分子它的直径也只有几十埃。

常见物质里含有的分子数目庞大无比。比如 1cm^3 的水里含有 335 万亿亿个水分子，把它们分给全世界所有的人，平均每人能够分到 8 万亿个。假想有一种极小的动物喝水，每 1 秒钟喝进 100 亿个水分子，喝完 1cm^3 的水至少要用 10 万年以上的时间！

分子的质量也极其微小， 1cm^3 水的质量是1克，含有的水分子是335万亿亿个，所以一个水分子的质量只有 2.99×10^{-23} 克。分子里最轻的成员是氢分子，质量小到只有 3.35×10^{-24} 克，拿一个氢分子质量和一个中等大小的苹果质量之比，大约相当于这个苹果质量和地球质量之比。

分子的热运动

组成气体的分子都十分好动。比如你种的茉莉花，一旦开了花，全家甚至邻居都可以闻到扑鼻香气；鱼、肉腐烂了，会弄得周围臭气熏天。组成液体的分子也很好动。你在一杯清水里滴入一滴墨水，墨水就会慢慢散开，和水完全混合。这表明一种液体的分子进入到另一种液体里去了。或者说液体分子在不停地运动。固体分子，也不很安分守己。比如把表面非常光滑洁净的铅板紧紧压在金板上，几个月以后就可以发现，铅分子跑到了金板里，金分子也跑到了铅板里，有些地方甚至进入1毫米深处。如放5年，金和铅就会连在一起，它们的分子互相进入大约1厘米。又如长期存放煤的墙角和地面，有相当厚的一层都变成了黑色，就是煤分子进入的结果。

证明液体、气体分子做杂乱无章运动的最著名的实验，是英国植物学家布朗发现的布朗运动。

1827年，布朗把藤黄粉放入水中，然后取出一滴这种悬浮液放在显微镜下观察，他奇怪地发现，藤黄的小颗粒在水中像着了魔似的不停运动，而且每个颗粒的运动方向和速度大小都改变得很快，好象在跳一种乱七八糟的舞蹈。就是把藤黄粉的悬浮液密闭起来，不管白天黑夜，夏天冬天，随时都可以看到布朗运动，无论观察多长时间，这种运动也不会停止。在空气中同样可以观察到布朗运动，悬浮在空气里的微粒（如尘埃），也在跳着一种杂乱无章的舞蹈。

发生布朗运动的原因是组成液体或者气体的分子本性好动。比如在常温常压下，空气分子的平均速度是500米/秒，在1秒钟里，每个分子要和其他分子相撞500亿次。好动又毫无规律的分子从四面八方撞击着悬浮的小颗粒，综合起来，有时这个方向大些，有时那个方向大些，结果小颗粒就被迫做起忽前忽后、时左时右的无规则运动来了。

你倒一杯热水和一杯冷水，然后向每个杯里滴进一滴红墨水，热水杯里的红墨水要比冷水杯里的扩散得快些。这说明温度高，分子运动的速度大，并且随着物体温度的增高而增大，因此分子的运动也做热运动。

热与冷的奥秘

在我们的现实生活中，人们以及众多的动物在身体内部及皮肤等组织中都有一个奇妙的传感器，它与感觉体表接触，压力、机械形变等的触觉、与感觉各种气味的嗅觉、感觉各种美味的味觉以及感觉色彩斑斓的光线的视觉一样，都对周围的某种特定的现象特别敏感。当我们的手拿一块晶莹透明的冰时，我们似乎感觉到了刺骨的寒意；当我们喝一口鲜汤时，如果性急一点，却总是感觉到火辣辣的烫，如电流般从嘴里一直传到肚子里；而当我们在夏日的酷热难当之际，喝上一杯冰镇的饮料，凉爽的感觉便油然而生，沁人心脾；在冬季的冰天雪地中呆久了，回到家中，温暖的感觉便立刻会弥漫全身，

倍感舒爽和惬意……如此种种，这便是我们在日常生活中的冷、热、凉、暖的奇妙感觉。虽然在生理学上说并没有“热觉”这么一种感官组织，但实实在在的，我们体内便有着这么一种传感器，来专门感觉我们周围的冷与热，凉与暖。从古至今，人们都与冷热的感觉结下了不解之缘。古代的人们更由这些感觉而总结出了许多原始的热学规律，虽然较为含糊和表观化，却也是为现代热学理论系统打下了坚实的基础。近代及现在的科学家们，利用这些积累下来的原始热学规律，再结合新发明的多种科学实验仪器，对冷热等热学现象进行了深入的探讨，从而产生了现代的较为完善的热学理论体系。

在浩翰的热学理论之中，最为简单，也最为基础的一部分便是对热与冷进行了量度，从而定量而不是定性地对热与冷这些感觉和现象进行了合理的科学的解释，揭开了冷与热的奥秘。

热与冷的对象与环境

当我们拿着一块冰，说它冰冷彻骨之时，实际上已经不自觉地要把这块冰当作了我们所讨论的对象。对于这块特定的冰，它有一定的外观形状，一定的体积和重量，如果说得更确切一些，它是由大量的水分子微粒组成的，在空间内由若干宏观的几何界面限制在一定的范围之内，像这块冰这样，有了一定的已知的宏观的约束与限制，还是由大量的微观粒子组成，这种形式的我们所描述的对象，热学中便称为体系，或者热力学体系。值得注意的是，组成热力学体系的虽然可以是原子、分子、离子乃至电子、光子以及其它粒子等等，但必须是大量的，且在一定的可以描述的宏观界面约束之内。少数几个粒子不能构成一个热力学的体系，几个水分子不能被称之为冰冷的冰块，因为这为数极少的粒子，我们已经无从谈起它的冷与热，无法用热力学性质去描绘它们，因而它们也就超出了热力的范畴，是非热力学体系。只有当一块冰，哪怕是很小的一块冰，但我们只取那其中的极小的部分，那一小部分仍能表达出冰的热力学性质，我们才说它达到了热力极限条件，这块冰才能称为一个热力学体系。在我们宏观的日常生活之中，各种冷与热的对象均具有 10^{23} 数量级的粒子数，体积线度也达到了厘米乃至米。比原子分子本身的尺度大得多，均是满足热力学条件的，因而均可称为热力学体系。

冷与热的物体，作为我们所描述的对象，一般是我们所不会忽视的。不过我们往往容易忽视所描述体系所处的周围环境。正如在力学中施力物对于受力物的研究是极为重要、必不可少的。热学中的环境对于体系也是至关重要，尤其是“热源”这个特殊环境，体系与环境之间总有特定的相互作用，比如环境规定了体系的宏观约束如界面、体积等，环境还可能与体系进行物质和能量的交换，从体系中吸走热量，或者给体系增加能量，从体系中分走一部分物质，或者增加体系中的物质等等。按照相互作用的不同，体系可分为三种类型：

1. 开放体系。体系与环境的边界可以进行物质和能量的交换，特别是物质交换。

2. 封闭体系。体系与环境的边界有效隔离，虽然可以传递能量，但不可以交换物质。

3. 孤立体系。体系与环境的边界完全隔离，既不可以交换物质，也不可以交换能量，即体系与环境之间没有任何相互作用。实际上这只是一种理想

化体系，因为任何体系与环境之间总是有相互作用的，象在地球上，任何一个体系都免不了受地球这个大环境的重力场作用，只是我们在研究体系的某些性质时，把与这种性质相关性不大的与环境相互作用可以忽略不计，从而抽象出理想化的孤立体系来。

体系的各部分之间，体系与环境之间不停地存在着复杂的相互作用，每个时刻的体系的相关性质，都可以用某些量参数来表达，这些参数便是这个时刻下特定状态的状态参数。一个体系，当在一定的情况下，它的若干宏观性质都不再随时间的变化而变化时，即它的状态参数不再因时间而不停地变化时，我们说这个体系达到了平衡，处于一种平衡态，平衡态的状态参数是很有实际意义的，它表现的性质往往是我们研究的对象，如一块冰的体积、热与冷、形状等等。这里之所以要强调它的若干的宏观性质而不是所有性质，是因为处于平衡态的体系内部仍处在运动变化的过程中，微观性质可能随时间的不同而不同，因而这种宏观上的平衡态，只是一种动态平衡。

热与冷的量度

我们在生活中所说的冷与热，在观念上只是一种人体神经系统的感觉，有一定的相对性。不过在热学理论中，冷与热的程度却是定量的可以用数值来量度，人们也都知道那便是温度。

两个具有不同的冷热程度数值的物体，当它们通过一定的壁而相互接触时，都会发生不同程度的相互作用。如果它们之间的壁透热程度好，是透热壁，则它们之间的相互作用较快，容易达到平衡态——热平衡；就是透热性差的壁，乃至理想化的绝热壁，也是有一定程度的相互作用的。人们在研究两个或多个物体通过一定程度的透热壁而相互作用的过程中，结合大量热平衡实验的结果，提出了一个非常重要的定律，这就是热力学第零定律：

“分别与第三个物体达到热平衡的两个物体，它们彼此也一定互呈热平衡”。

热力学第零定律也称为热平衡传递原理。物体 A 与物体 B 互呈热平衡，物体 B 又与物体 C 互呈热平衡，那么物体 A 就与物体 C 互呈热平衡，热平衡这种性质便通过 B 而由物体 A 传到了物体 C，就象接力一样。这个定律是来源于实践的，但在某种意义上又高于实践，具有普遍性的品格。它揭示出均相体系存在着一个新的平衡性质，那就是冷热程度的数值的表示——温度。于是第零定律的内容也可以用温度定理来表述：“任一个热力学的均相体系，在平衡态各自都存在一个状态函数，称之为温度；它具有这样的特性，对于一切互呈热平衡的均相体系其温度彼此相等。”

温度定理揭示出温度是热力学体系的一个宏观的状态参数，是体系自身热运动性质的反应；这个状态是通过什么途径来达到的，如一瓶水的水温是由冷水加热达到还是由热水降温达到，或者是由冷水与热水混合达到，都与它这个状态参数——温度并没有必然的因果关系。另外，一块冰分成不同大小和形态的两块，它们仍将具有原来的热平衡状态，仍具有原来的温，从而也表明了温度是一个具有特殊性质的物理量，它不象重量、体积、微粒数量等物理量那样具有加和的性质。

热与冷的尺度

每一个物体，它的长度、重量等都是这个宏观物体的内在属性，它与人们称量它们的方式及我们所使用的长度及重量单位是完全无关的。但是，如果要得到一块铁条的长度的数值重量的数值，我们就规定长度、重量的单位，才可以表达出这块铁条长度为 10 厘米或 3 寸，重量为 0.5 千克或者 1 市斤。这便是度量单位对于物体的宏观参数的数值表达的重要性。

同样，温度也是一个物体体系的宏观状态参数，它与温标的选择是无关的；但如果我们想以一定的数值表达出来，从而进行相互的比较或者交流，那我们就必须选定一种温标。温标包括指定的单位及所选的固定点的温度数值，在这里，固定点一般选用各物质纯净态各相间的平衡态，因为那样的状态是可以重现的，而且具有相同的状态值。在人们对温度的标定的漫长历史过程中，先后选用过多种温标，如摄氏温标、华氏温标、气体温标及热力学温标等，其中可以分为经验温标和热力学温标。

由于水是人们日常生活中间很广泛的很常见的物质，因而人们在许多方面都尽量利用了水的各种性质，温标的确定也同样如此。很久以前，人们发现在一个标准大气压下，只要是纯水与纯冰的混合物，不管是大量的水与少量的冰组成的平衡态，还是少量的水与大量的冰组成的平衡态，它们都具有相同的冷热程度——温度，于是人们便把冰与水在一个标准大气压下达到平衡时的温度称为冰点，规定为温标中的其中的一个固定点——0 ；同样，在一个标准大气压下纯水与纯水蒸汽达到相互平衡时，不管它们相互之间的数量比例如何变化，均具有一定的温度数值，即为汽点，成为温标中的另一个固定——100 ，再把 0 与 100 之间均分为 100 个等分，一分就是 1 。于是一种经验温标——摄氏温标就建立了。这种和别的种类的经验温标给我们的生活带来了极大的方便，天气预报中的气温，我们身体的体温等便有了准确的尺度来衡量了，因而被广泛地应用于生活及科研之中。不过，在 1954 年，为了提高温度数值标定的准确性，国际上规定了另一个固定点，即纯冰、水、水蒸汽三相共存平衡时的温度，称为水的三相点，并规定它的温度值为 273.16 开尔文，写作 273.16K。这个规定，使我们常用的经验温标如摄氏温标与热力学温标有了一个统一标准。因为热力学温标的一度（1K）是水的三相点温度的 1/273.16，且摄氏温标的零点又被规定为 273.15K，于是，摄氏温标与热学温标之间只是计算温度的起点不同，温度间隔 1 与 1K 是一样的，以 T 代表热力学温度，t 代表摄氏温度，则有：

$$t = T - 273.15$$

另外，还有一种华氏温标，以 T 表示华氏温度，则它与 t 的关系为：

$$T = 32 + \frac{9}{5}t$$

于是，冷与热的衡量尺度便有了相通性，象我们在长度上使用的米与尺寸，在重量上使用的千克与斤的关系一样。

热与冷的测量

18 世纪是热力学的真正开端，首先是计温学在这一时期迅速地发展起来。尽管伽利略、盖利克、让·莱伊以及西门图学院的院士们已在 17 世纪发明了第一批验温器并不断作了改进，但它们仍不便于得出定量测定的结果，不同

验温器中的不同测温质、不同固定点、以及刻度的随意性等使这些验温器只适于对该处温度涨落作相对的估计。

出生巴黎的阿蒙顿，先后独立研究过天体力学、物理学、数学、建筑学。他早年就变成了聋子，这给他的生活带来诸多不便，也使他无法找到职业。但阿蒙顿并没有为这个不幸而感到痛苦万分和悲观失望，他认为能不能听到声音无法阻挡他心爱的研究工作，他甚至乐观地从这不幸中看到了有幸的成分，因为可以不受外界干扰，而专心致志地从事实验研究。

1703年，阿蒙顿提出了气体测温计的一个有趣的结构，这是一个外形呈U字形的固定体积的温度计，主要利用空气的压强来测量温度。

阿蒙顿在U形玻璃管的较短的一臂上连接一个空心玻璃球，较长的一臂长45英寸。将水银注入U形管中并进入玻璃球的下部。测温时用水银始终保持球内空气的体积不变，而用两边水银面的高度差——即球内定容气体的压强与大气压强之差来量度温度。

阿蒙顿将玻璃球先放入冰中，然后再放入沸水中，记下了这两种情形下的水银面的差值（以英寸为单位），并假定玻璃球内空气的压强正比于温度而变化，从而使他能够依据长臂中水银面的位置来确定任意温度。

但是，由于阿蒙顿只选择了水的沸点作为一个固定点而并不了解水的沸点受大气压的影响，所以他的温度计并不十分准确；加之这种温度计的结构，用于实际目的也不方便，所以还不是实用的温度计。

在计温学的发展史上，第一只实用的温度计是由德国迁居荷兰的玻璃工匠华伦海特于1709年开始制造的。华伦海特迁居荷兰后，学习和掌握了制作玻璃器皿的技术，成为一个气象仪器制造商。1708年，他到丹麦首都哥本哈根旅行，看到了罗默制作的温度计。回到荷兰后，他就开始制作罗默温度计。在了解到阿蒙顿利用水银制造的温度计后，华伦海特也改用水银代替酒精，并开始研究温度计的精密结构。

华伦海特制造实用的温度计深受阿蒙顿工作的影响，这从他提交给《哲学学报》的一篇论文中充分地反映出来。华伦海特写道：“我从巴黎皇家学会出版的《科学史》获悉，著名的阿蒙顿曾用自己发明的温度计发现水能在某一固定温度下沸腾的原理。我心中立即产生了一种愿望，很想自己做一个类似的温度计，俾能亲眼看到那瑰丽的自然现象并证实他的实验的正确性。”

然而制造出实用的温度计虽不是一件易事，却是一件十分迫切需要的事。当时，荷兰的阿姆斯特丹市出现了少有的严寒，几乎每条街的屋面上都是皑皑白雪。

华伦海特家来了两位老人，一进屋就发生了争论：一位说，“即使年岁再大的老人也不记得有过这样的严寒了。”另一位则不服气地说，“可是到底谁知道今年是不是最冷呢？很可能，几百年前的冬天要比我们今年的冬天还要冷呢？要是我们不在人世的话，不知道今后是什么情况呢？”此时，年仅23岁的华伦海特也加入到争论中来。他目光炯炯，颇动感情地说：“我找到了一个办法，有了这个办法，在许多年之后，我们的子孙们可以说出到底哪个冬天最冷了。”

两位老人都笑了起来，异口同声地说：“你有什么好办法呢？”华伦海特很有礼貌地站起身，用手向外一指，“请原谅，到我的小工场去参观一下吧！”两位老人随华伦海特向一所房子走去。他们所见到的东西使他们大为吃惊。一个很大的熔铁炉占去了大半个房间，炉旁是垛成堆的大大小的管

子、一个小熔炉以及许多五花八门的玻璃仪器。

华伦海特把老人领到桌前，桌上摆着一些器皿，器皿上安装着一些细高细高的、底部封闭的玻璃管。管子里有的装着带色的酒精，有的则装着水银。

“请看！”华伦海特用手摸着一个小管子说，“我在这根玻璃管里充满了酒精。”他用手指着另一个小管子说，“在这根管子里注入了水银。”华伦海特继续说，“请注意，在这两个管子上都有刻度。当我把这两个管子浸到热水里时，酒精或水银都会升高。而我标定 0° 点的地方是我把管子浸在冰、水、氯化铵的混合液体里时，酒精和水银停止的地方，这是我所能得到的最低温度。因此，我认为即使是最寒冷的冬天，也可用这些温度计表示出来。”

“不可思议”其中一位老人耸了耸肩，“怎么能拿玻璃皿里的冷与上天安排来折磨整个世界的严冬相比较呢？”

“可以比较，可以！”华伦海特一点儿也不让步，“温度计中的酒精或水银是活动的，将温度计放在室外可以表示温度的变化。酒精或水银柱的高度在冬天比夏天要低，没有一个冬天能使酒精或水银下降到像在这个混合液里一样低。”……

华伦海特送走了两位老人，继续进行温度计的研究。1724年，他在皇家学会的刊物《哲学学报》上发表了制造温度计的方法，即发表了关于实用温度计的第一篇论文。他那时所设计的温度计选用了两个固定点：结冰的盐水混合物的温度和人体的血液的温度，并把它们之间的间隔分为96度。在华伦海特后来发表的论文中，他又采取了不同的刻度法，其中最后一个刻度法后来以他的名字命名。这个刻度法规定了三个固定点：冰、水和氯化铵的混合温度，用 0° 来表示；冰、水混合温度，用 32° 标出；水的沸点，为 212° 。

当华伦海特的温度计被荷兰和英国人采用时，其他国家却迟迟看不到它的价值。而法国博物学家列奥米尔为了消除刻度不一致的困难，致力于制造一个既方便又能达到精确要求的温度计。他只取一个定点，即雪的熔点为 0° ，而把酒精体积改变 $1/100$ 的温度变化作为 1° ，这样水的沸点就为 80° 。但是，列奥米尔温度计的实用效果并不很好，各种各样难于置信的读数都被显示出来。

1742年，瑞典天文学家摄尔修斯在《对一个寒暑表上两个固定点的观察》一文中引入了百分刻度法。他用水银作测温质，研究了雪的融化点和水的沸点与大气压力的关系。在进行这个试验时，他将温标上这两个点之间分成一百个格并把水的沸点定为 0° ，冰的熔点定为 100° 。后来他接受同事斯特雷姆的建议，也可能受到植物学家林耐的提醒，把这两个定点的标度值对调过来。

以上各种温度计中，摄氏温度计较实用、方便。1948年第9届国际计量大会，把百分刻度法定名为摄氏温标。它有两个定点：纯水在标准大气压下的沸点，冰在标准大气压下与由空气饱和的水相平衡时的熔点。1960年第11届国际计量大会决定，把水的三相点温度作为热力学温标的单一定点，并定为 273.16K 。

热与冷的感觉

前面说过，人们对冷与热的研究，首先是从感觉开始的，并逐步发展到它的数值表示的量度、单位、测定的仪器等。这个过程中，感觉所涉及的热现象也可以说是功不可没。不过感觉仅仅是感觉，当我们知道了冷与热的实际量度标准——温度时，再来看感觉，便可发现感觉到的与实际上的现象并不那么完全一致。

在寒冷的冬天里，冰雪季节里的农家一般都在卧室里烧上了炕灶，从而使卧室里温暖融融，而没有取暖设备的门厅则相对室温较低。当你在卧室里呆了好久而后出门厅时，感觉到的总是冷，至少也有几分凉意，不过，你可别怨门厅太缺乏温暖。你若在外面的冰雪世界中玩赏了许久后进入门厅，便会立刻觉得暖融融的，无比舒服。同样是门厅，按理说温度是一样的，它也不会自己由冷变热，那为什么感觉却是冷与热的截然相反呢？

原来，人和动物对热现象的触觉，虽然归根结底是与温度这个物质的内在属性相紧密关联，但并不是直接感觉到温度，而是与物体与人体表皮的热交换直接相关。温度比人体表皮温度高的物体，接触时能量就会从物体传给表皮中的热传感器，传到中枢神经系统，便形成了热的感觉，反之，温度比人体表皮温度低的物体，与表皮接触时能量就会从表皮传向物体，中枢神经系统得到的就是冷的信息，可见，冷与热定性地说，仅仅是所说的物体与人的相对温度高低，温暖的卧室里的人进入门厅，表皮温度较高，而雪地里的人进入门厅，表皮温度较低，故而会形成冷与热的相反的感觉。

人的感觉所区分的冷、凉、热、温暖，实际上是对环境或物体与表皮温度相差的大小的粗略分辨。如果温度大大低于表皮的，表皮传给物体热量的速度就因温差大而快，失去热量速度快在表皮传感器的反映下便是冷了；如果物体温度只是稍低于表皮的温度，那么，由于温差较小，表皮失去能量的速度就相对慢得多，人体所感觉到的冷的程度因而也就轻得多，仅仅是感觉到凉爽而已。反之，如果环境或物体温度远高于表皮的温度，它们与表皮接触时，大量的热量就因为温差大而以较快的速度传递给表皮，热或者说烫的感觉便极为明显了，而温度只略高于表皮温度的物体在与表皮相接触时，温差就较小，能量传递给表皮的速度就较慢，我们就不会感觉到烫，而只是觉得温暖了。

可见，温度的高还是低，温差是大还是小，是我们感觉冷与热的界限以及冷与热的程度的直接原因。不过，我们有时接触到某些物体，比如是一块铁块与一块木头，有时总觉得铁块比木头凉，或者总是铁块比木头烫，然而测量它们的温度却完全一样，这又是为什么呢？

原来，虽然铁块与木头与表皮的温差是一样的，但接触后的很短时间内，表皮与铁块和木头都会发生热交换而影响接触点的瞬时温度。由于铁块是热的良好导体，传热性能好、传热速度快，而木头则传热慢、传热性能差，是热的不良导体，因而表皮传给铁块的热量就比传给木头的热量容易疏散，瞬时升温就会低于木头接触点的瞬时升高，从而就以较大的温差而容易从表皮更快地获取热量，从而给我们的感觉是同样温度的低温铁块比木头要凉。同样，较高温度的等温铁块与木块，则由于铁块易于传热，热量就容易从各处传给接触点再传给表皮，因而表皮吸收热能的速度较快，感觉也就是铁块比木头更烫了。

现实生活中的热现象及人们对热的感觉还不胜枚举，有的相对较简单，有的则较为复杂。不过掌握了热力学第零定律及温度定理，我们就会把握住

热与冷的奥妙，为我们理解这千奇百怪的热学现象打开了方便之门。

量热学的发展

热的传递

大量现象表明，热可以从一处向另一处传递，这种过程称为热传递。热传递有三种明显不同的基本方式：热传导、对流和辐射。

人们早就从生活和生产实践中熟悉了热传递现象。在我国古代的《尚书·洪范》篇中有“火曰炎上”的说法，指出火有炎热向上的基本性质。这里所说的“向上”特性，其实就是对于大量存在的自然对流现象的一种概括。东汉的王充在《论衡·寒温》篇中写道：“夫近水则寒，近火则温，远则渐微。何则？气之所加，远近有差也。”他认为热的传递是靠“气”的作用进行的，这种作用和距离成反比。实际上王充所揭示的这一现象中既包含有热传导、对流，也包含有热辐射。

热传导和对流现象由于比较直观，所以人们早就利用实验方法对它们进行了多方面的研究，掌握了这两种热传递过程的一些具体规律。但是，对于热辐射的了解和研究却开始得比较晚。

早在1673年，英国科学家波义耳就发现在真空容器中放入炽热物体时，器壁上仍然能够感到热。当然，他不了解这是热辐射的作用。“辐射热”这个术语是瑞典出生的化学家卡尔·威廉·舍勒最先提出来的。他在1777年出版的《论空气与火的化学》中，在叙述他所发现的氧（“火空气”）时曾经提及热辐射现象，指出热辐射可以穿过空气，玻璃镜不反射热辐射，但金属镜却能反射热辐射。在舍勒之前，德国的天文学家和光学家兰伯在1760年出版的《光度测定法》中，根据冶金工人利用眼镜保护眼睛免遭强光灼伤的经验，曾指出玻璃能够挡住热辐射。

法国的皮克泰特对热辐射作了进一步的实验研究。他用金属做了两个凹面镜，彼此相距二十五米远面对面地放置。在一个镜的焦点放一支灵敏的温度计，在另一个镜的焦点轮换地放置被加热的和未被加热的没有光泽的金属球，两镜之间放一隔板。当拿走隔板后，温度计的读数就随着所放的金属球的温度迅速升高或下降。如果将温度计的小球涂成黑色，这个效应将更明显。但如果将温度计放在焦点之外附近处，它却指示着不变的读数。这个实验使皮克泰特确信存在着和光线相同的“热线”，辐射热就是热线的传播。皮克泰特还证明，上述实验中的凹面镜不能用玻璃镜代替，玻璃板还会阻断热线的传播。

1791年，瑞士的普雷沃斯特在皮克泰特实验的基础上建立了他的“火的平衡”理论。他认为每个物体都放出热辐射并从周围的物体吸收这种辐射；当物体的温度高于周围环境的温度时，它因辐射而失去的热就多于它从周围介质所吸收的热；相反，较冷的物体从周围介质吸收的热则多于它辐射出去的热，从而实现了热从较热物体向较冷物体的传递。在热平衡时，这种通过辐射而在物体之间进行的热交换仍在进行着，但每个物体吸收的热恰好等于它所辐射出去的热，所以物体的温度保持不变。普雷沃斯特从火同时产生热和光的事实中，得出了热辐射和光线相类似的思想，指出这种辐射按照普通光线的规律传播。

十年以后，普雷沃斯特的理论得到了英国人威廉·赫舍尔的实验证实。赫舍尔用灵敏温度计检验了太阳光谱中不同部分的加热能力，结果发现，越向光谱的红端移动，升温效应就越强，在光谱的红端之外，仍然发现了温度的升高。赫舍尔由此得出了存在着不可见射线的结论，这种射线按照光线的规律传播，并产生很强的热效应，红外线就是这样被发现的。接着李特尔和沃拉斯顿又发现了紫外区不可见的射线，即紫外线。

赫舍尔关于存在着不可见的热射线的结论受到了爱丁堡的约翰·莱斯利等一些人的反对。莱斯利是一个热质说的拥护者，所以他不接受辐射热和光之间类似性的见解。他把红外区的热效应看作是来自可见光光谱部分的空气流。但是戴维却用实验证明，在部分真空中的辐射要比在正常压力下的空气中大两倍，而这里显然不会存在什么明显的空气流，这就以实验事实有力地反驳了莱斯利的见解。

辐射热的知识通过意大利的梅隆尼的研究而取得了明显的进展。他在1850年发表的《热色，或者热质的颜色》这本巨著里，叙述了他对辐射热的研究。他用更为灵敏的温差电堆代替温度计对热辐射进行研究，使他明确认识到，热辐射也象光线一样具有多样性。1843年他就说道：“对视觉器官而言，光仅仅是一系列能被感知的热的征状；反之也一样，不发亮的热辐射可以证明是不可见的光辐射。”由此必然得出结论，光线必然伴有辐射热，因而月光也应当显示出热效应。经历了初期的失败，1846年他在维苏威山上用一个直径为一米的多区域光带透镜，一个温差电堆和一个电流计，终于从月光中得到了微弱的热征状。

梅隆尼以类比为“透明度”之于可见光，而创造了“透热性”一词用于热辐射，并用实验检验了各种物质的透热性能。他的实验表明，岩盐对于热射线具有很大的“透明度”，而冰和玻璃却强烈地吸收各种辐射热。他还测定了不同厚度的各种固体和液体的热透射率。梅隆尼的工作后来又为英国物理学家约翰·丁铎尔所发展。这方面研究的进展，最终导致了“黑体辐射”的研究，并成为“量子”概念产生的前提。当然，现在我们知道，“热辐射”的现象并不属于通常的“热学”研究的范围，因为它和我们通常所理解的热——大量微观粒子的杂乱运动——在本质上是有所区别的。只是在考察热的传递时，我们才需要考虑热辐射这种方式。

混合量热问题

广泛存在的热传递现象，使人们很自然地产生了一种直觉的猜测：在冷热程度不同的物体之间，似乎总有某种“热流”从较热的物体向较冷的物体传递，从而引起物体冷热状态的变化。在蒸汽机的研制中遇到的汽化、凝结现象以及冶金、化学工业中涉及的燃烧、熔解、凝固等过程中引人注目的吸热、放热现象，也关系到“热流”的传递。对这种“热流”进行定量的测量和计算，是对热现象进行精确的实验研究所必须解决的问题。因此，从18世纪中叶开始，在热学领域内逐渐发展起了“量热学”这个新的分支。

在量热学中最早期的工作是研究具有不同温度的液体混合之后的平衡温度问题。这个问题在今天看来自然是十分简单的，但是在18世纪前半叶，它却使一些很有才华的科学家陷入惶惑和重重矛盾之中。困难的根源在于要把描述热现象的两个最基本的概念——温度和热量——明确地区别开来，这并

不是很容易做到的。

我们已经谈过，自从伽利略以来，经过大量的研究工作，人们制造出了愈来愈精确的温度计，并在医学、热学和气象学的研究方面获得了广泛的应用。温度计的发明使准确地测定物体的冷热程度以冷热变化的幅度成为可能，无疑把人类对热的认识大大推进了一步。但是，温度这个物理量反映着热的什么本质呢？在当时的人们看来，物体的冷热程度理所当然地应该反映出物体所含有的热的多少；所以，人们确信温度计测量的就是“热量”。在当时的一些科学著作中，不难找到这类表述：物体“具有多少度热”，物体“失去了多少度热”；在温度计上显示不同度数的物体“它们原来的热都各不相同”。

荷兰莱登大学的医学和化学教授波尔哈夫就是从这种观点出发来考察混合量热问题的。在他看来，一定量的物体温度每升高一度都应当吸收相同数量的热，这个数值同它每降低一度时放出的热必然相等。波尔哈夫同华伦海特一起试图用实验来证实这个猜想。他们把 40 °F 的水和等体积的 80 °F 的水相混合，测出混合后的水的温度恰好是平均值 60 °F，表明冷水所吸收的热和增加的温度，恰恰等于热水所放出的热和降低的温度，这同他们预期的结果完全一致。波尔哈夫由此断言：“物体在混合时，热不能创造，也不能消灭”，这是混合量热中热量守恒的思想。

这个实验结果使波尔哈夫确信，同体积的任何物体，在温度相同的情况下都含有同样数量的热；在相同的温度变化下，它们吸收放出的热也应当一样。但是，当他们用不同温度的水和水银的混合实验来检验这个推断时，却得到了否定的结果。他们将 100 °F 的水和等体积的 150 °F 的水银相混合，混合后的温度是 120 °F，而不是预期的中间值 125 °F。这个结果表明，等体积的水和水银温度发生相等的改变时，热的变化是不一样的，这个事实是波尔哈夫所无法解释的，所以称为“波尔哈夫疑难”。

俄国的物理学家们遇到了同样的困惑。1744 年，彼得堡科学院的克拉弗特在一个报告中提出了一个确定混合温度的公式：

$$X = \frac{\gamma a m + \delta b n}{\gamma a + \delta b}$$

式中 a、b 是混合前两部分水的质量，m 和 n 分别是它们的温度， γ 和 δ 是两个系数。这个公式本来已经引进了物质的热容量这一因素，完全可以作为求混合温度的一般公式。但是，克拉弗特从一个实验结果就武断地认为， γ 和 δ 的数值分别是 11 和 8，因而使他的公式失去了普遍价值。这个严重失误表明，克拉弗特的思想中尚没有关于物质热容量的清晰概念。

也是在 1744 年，罗蒙诺索夫的朋友，著名的俄国物理学家黎赫曼向彼得堡科学院作了一个关于混合量热法的报告（1750 年发表于《彼保堡科学院新评论》），从理论上得出了将几部分不同温度的水相混合后计算混合平衡温度的“黎赫曼公式”。用我们现在通常使用的符号可将这个公式表示为

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \Lambda \Lambda + m_n t_n}{m_1 + m_2 + \Lambda \Lambda + m_n}$$

这里 m_1 、 m_2 、……、 m_n 是混合前各部分均匀液体（水）的质量， t_1 、 t_2 、……、 t_n 是各部分均匀液体的温度，t 为混合后的平衡温度。在推导这个公式时，黎赫曼认为质量为 m_1 、温度为 t_1 的一份水所包含的热为 $m_1 t_1$ ，所以

这 n 份水混合之前所包含的热总量为

$\sum_n m_i t_i$ ，它理应与混合液体（水）包含的热 $(\sum_n m_i) t$ 相等，即

$(m_1 + m_2 + \dots + m_n) t = m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_n t_n$ ，于是就得到了上述公式。

黎赫曼还指出，在运用这个公式求混合温度时，必须注意到容器的质量和温度，周围空气的温度以及实验进行的时间等情况；为了减小误差，必须采取严格的预防措施，以消除外界因素的影响。但是，人们不久就发现，黎赫曼公式只适用于不同温度的水的混合（或者其他相同物体的混合）。在把它应用于冰水混合的情况时，计算出的混合温度就比实际测定的温度高得多，从而显露出了黎赫曼量热理论的缺陷。

热学研究的伟大先驱约瑟夫以其对量热学基本概念的明确分析，驱散 7 笼罩在这个领域里的迷雾。

大约在 1757 年前后，布莱克重新审查了波尔哈夫等人的工作，并重复了他们的实验。再次证实相同重量的两份不同温度的水相混合，混合温度正好是它们的中间值；而把相同重量的热水和冷的水银混合起来，混合温度却更接近于水而不是水银的温度。这个事实表明，不同物质的温度变化与热的变化并没有相同的比例关系，一定量的水冷却一度所释放的热要比同样重量的水银加热一度所吸收的热多些。“波尔哈夫疑难”产生的原因，在于他假定了同体积的两物体在温度相同时也包含了同样数量的热。布莱克指出：这是“把问题看得太马虎了。这是把不同物体中热的量和热的强度或集度相混淆了。很明显，这是不同的两件事，在研究热的分布时，我们应当经常加以区分。”他断言，同重量的不同物质在发生相同的温度变化时之所以会有不同的热的吸收或释放，是因为不同的物体对热具有不同的“亲和力”。所以他极力主张将热和温度两个概念区别开，分别称为“热的量”（热量）和“热的强度”（温度）。

应该指出：在布莱克之前，法国物理学家阿蒙顿已经指出，温度计测量的不是热量，而是物体的受热程度。但是直到布莱克区分了两个概念之后，才澄清了这方面的混乱。说明在人类认识的发展中，要搞清楚某个基本概念并不是很容易的，但一经辨别清楚，就会使科学得到飞速进展。实际上，正是由于正确地区分了热量和温度这两个概念，布莱克自然地引出了“热容量”的概念。他把各种物体在改变相同温度时的热量变化叫作这些物体“对热的亲和性”，“接受热的能力”或者简称“热容”。实验表明，取相同重量的一份水和一份水银，给它们输入相等的热量，水银的温度变化远比水的温度变化显著得多，这说明水“接受热的能力”远大于水银“接受热的能力”。他的学生伊尔文正式引入“热容量”这一术语，表示物体温度变化一度时的热量变化。“比热”这一术语是伽托林引入的，表示单位重量的某种物质在温度改变一度时所改变的热量。波尔哈夫的实验表明，水银的比热比水为小。

布莱克根据他的发现重新表述了热量在几个物体之间重新分配时总量保持不变的概念。他写道：“当加热后的水银（ 150°F ）与热水（ 100°F ）相混合时，混合物的温度降为 120 而不是 125°F 。这样，水银冷却了 30°F 而水的温度升高了 20°F 。但是，水所得到的热量却等于水银所损失的热量”。综合这些成果，如果以 c 表示物质的比热，正确的混合量热公式则应表为：

$$\text{混合后的温度 } t = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2 + \Lambda \Lambda + m_n c_n t_n}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \Lambda \Lambda + m_n c_n}$$

几乎在同一时期，瑞典的的维耳克也在从事着量热学的研究，他似乎是独立地引入了“比热”概念。他指出，如果把水的比热定为 1，就可以通过水和其他受热物体混合时温度的变化计算出该物体的比热。

潜热的发现

由于布莱克等人区分了热量和温度两个概念，并引入了热容量和比热概念，正确的混合量热公式和几个物体进行热混合时热量总量保持不变的观点终于建立起来。但是，随着量热学的进一步研究，人们发现前面所述混合量热公式并不总是适用的；在某些热学过程中，部分热量似乎“失掉”了。

我们知道，在通常情况下，物质的存在形式有三种状态，即固态、液态和气态。在一定条件下，物质可以从一种状态转变为另一种状态。这种物态变化在物理学上称为“相变”。在我们居住的地球上，水的三态变化很容易实现，所以物态变化是人们早就熟悉的现象。

人们在研究相变时，发现了一个奇特的现象。

1754 年冬天，德留克在巴黎做实验时，把温度计插入装有水的容器中，待水完全凝固成冰后，将容器放到微火上慢慢加热。德留克发现，起先，温度示数缓缓上升；但当冰开始融化时，虽然继续加热，温度示数却保持不变，直到冰完全熔解后，温度示数才重新缓缓上升。那末，在这段时间内冰所吸收的热量到哪里去了呢？德留克设想，热量必是以某种形式被束缚起来了。他又以适量的水和冰混合起来进行实验，得到了同样的结果，即一部分热量似乎“消失”了。

在德留克的发现发表之前，布莱克也独立地作了类似的实验。他把 32 ° F 的冰块与相等重量的 172 ° F 的水相混合 结果发现 ,平均温度不是 102 ° F ,而是 32 ° F ,其效果只是冰块全部融化为水。布莱克由此作出结论：冰在熔解时，需要吸收大量的热量，这些热量使冰变成水，但并不能引起温度的升高。他还猜想到，冰熔解时吸收的热量是一定的。为了弄清楚这个问题，他把实验反过来作，即观测水在凝固时是否也会放出一定的热量。他把摄氏零下 4 ° 的过冷却的水不停地振荡，使一部分过冷却水凝固为冰，结果温度上升了；当过冷却水完全凝固时，温度上升到摄氏零度，表明水在凝固时确实放出了热量。进一步的大量实验使布莱克发现，各种物质在发生物态变化(熔解、凝固、汽化、凝结)时，都有这种效应。他曾经用玻璃罩将盛有酒精的器皿罩住，把玻璃罩内的空气抽走，器皿中的酒精就迅速蒸发，结果在玻璃罩外壁上凝结了许多小水珠。这说明液体(酒精)蒸发时要吸收大量的热，因而使玻璃罩冷却了，外壁上才凝结了水珠。

布莱克用一个很简单直观的办法来测定水汽化时所需要的热量。他用一个稳定的火来烧一千克零摄氏度的水，使水沸腾，然后继续烧火，直至水完全蒸发掉。他测出使沸腾的水完全蒸发所烧的时间，为使水由 0 ° 升温到沸腾所烧的时间的 4.5 倍，表明所供热量之比为 100 : 450。这个实验当然是很粗糙的，所测的数值也有很大的误差；现在的测定表明这个比值为 100 : 539。布莱克还用类似的方法测出，熔解一定量的冰所需要的热量，和把相同重量的水加热 140 ° F 所需要的热量相等(相当于加热 77.8 ° 所需要的热