

## 物理学咬文嚼字之二十八

## 温度：阅尽冷暖说炎凉

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

饮水鱼心知冷暖，濯缨人足识炎凉。

——[唐]罗隐<sup>1)</sup>

温度测量的历史是科学发展史的组成部分……

——Thomas D. McGee

**摘要** 感知冷热是生命必备的能力，因此冷热概念的出现远远早于热力学这门学科，也就难免纠缠不清。热、冷、火在英文物理文献中都有多重表述，而温度也是非常不易正确理解的物理学基本概念之一。

## 1 世事总关炎凉

茫茫宇宙中一粒微不足道的尘埃——地球——上诞生了生命。注意到地球的平均温度约为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，生命的物质基础之一是水而水的凝固点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，以及生命作为一个远离平衡态的耗散体系需要不断获得能量，而地球的能源是来自太阳的辐照等几个事实，就可以多少理解生命所选择的温度窗口（必须处于环境温区的高端）以及对冷暖的敏感<sup>2)</sup>。可以说一切生命最重要的感觉能力是对冷暖的感知（对许多高级动物来说，视觉或者听觉是备选项），过去中国人甚至将知冷知热看作是一个人作为好的配偶所必备的品格。在中文语境里，温和、温暖、温柔等贴近我们体温的词汇都让人感到非常温馨，在其他文化中大概也应如此，毕竟“环球同此凉热”<sup>3)</sup>。

冷热的概念在人体发育的早期就应该建立起来了。给婴幼儿喂奶喂饭，一开始由大人掌握冷热，而后就要教孩子自己明白冷热。舒适的温度，应该是体温附近不大的范围，它首先是生理的需要，其后慢慢成了心理的需求。我们一个人一生中最需要理解的现象也许就是世态炎凉，人情冷暖！人类自愚昧中走过来，在其科学努力中自然会将很大的精力放在理解冷暖现象上。于是，我们发展了热学、热力学，而这其中要理解和量化的一个重要概念是冷热程度，即温度。

## 2 混乱的字面

冷热是我们身体的感觉，因此我们关于冷热现象相关的词汇一定比热力学这门科学出现的早，也就容易想象存在某些概念上的夹杂不清。再考虑到英语的复杂来源，以及热力学在德、法、英几乎同时发展的历史现实，可以想见英文科技文献中与热有关的词汇会有许多不同的面目。首先，热力学关注的基本量是热量(liàng)，是能量的一种特殊形式。中文里热如今既是具体的名词(溶解热)，也是抽象名词代表“热的”这种感觉、这件事(旅游热)，也是形容词(热心肠)；相应地，德语里“热的”是 heiß，而具体名词热，die Wärme，对应的形容词却是温暖，warm；英语里“热的”一词，hot，来自德语 heiß，但是词形变化丰富：“热的”这种感觉、这件事为 hotness，热量则是 heat。德语形容词 warm 传入英语后，其对应的名词 warmness，是温暖的感觉，却没有热量的意思。汉语科技名词中涉及热的还有热解(裂解)的说法，是对 pyrolysis 的翻译。Pyros 来自

1) 罗隐可算深知人间冷暖，一句“我未成名君未嫁，算来都是不如人”道出古今多少人的椎心之痛。——笔者注

2) 许多动物为了找寻温度合适的外部环境不得不每年都作长距离的迁徙。人类的策略是发展出了取暖和乘凉的科学与技术。热力学和电动力学能很好地解释趋炎附势现象，因此也应该是社会学的理论基础。——笔者注

3) 语出毛泽东《念奴娇·昆仑》，作于1935年。——笔者注

希腊语  $\pi\eta\rho\omicron\varsigma$ , 是火的意思. 同样与火同源的字还有 fever (发热、发烧), 德语为 das Fieber. 如果知道中文的“热”字, 从火, 是形声词, 这一点就很好理解.

热学作为一门学科在德语里为 Wärmetheorie, 英文为 heat theory, 此为热力学的前身. 热力学, thermodynamics (thermo + dynamic), 来自希腊语. 但是, 希腊语 θερμός (thermos) 的意思恰恰是“温的”, 形容词“热的”是 καντός (kantos) 和 ζεστός (zestos). 说到热量, 英文中也用 calorie (汉语直接音译卡路里, 或干脆“卡”), 谈论营养保健、运动塑身的人喜欢用“卡路里”代表热量. Calorie 这个词来自拉丁语 calere, 意思是 to be warm, glow, glow with heat. Glow with heat (热而发光) 就是白炽灯的原理, 后文我们会看到这个问题在近代物理学中举足轻重的地位. Calorie 在希腊语中也是“热的”意思, 比如热辐射体 radiator, 希腊文就是 σώμα καλοριφέρ (caloric body). 在罗曼语族的语言中, “热的”一词都和 calorie 相仿佛, 如这句西班牙语“La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío (温度是度量热或冷的量)”中的 calor.

为了表征冷热的程度 (degree of hotness or coldness), 人们引入了 temperature 的概念. 冷热的程度不是热度也不是冷度, 而是温度, 如 temperature 的本意. Temperature 的同源动词 temper 为调和的意思, 如 to temper criticism with reason (批评中加入说理), to temper paint with oil (用油调漆). 形容词 temperate 的意思是温和的, 如 a temperate reply (温和的答复), a temperate climate (温和的气候), 等等. Temperate 若指冷热程度, 其近义词有 tepid, mild 和 lukewarm (舒适、惬意). 莎士比亚最著名的十四行诗“Shall I compare thee to a summer's day?” 的起始两句

Shall I compare thee to a summer's day?

Thou art more lovely and more temperate.<sup>4)</sup>

其中的 temperate 指的就是好脾气、温顺、温婉的意思. 此外, 拉丁文 temperatura 本意有不过分的意思, 比如关于美之标准的冷冰冰的严格对称性与其说是要达到的标准, 勿宁说是一种在其基础上要偏离的标准: “但这偏离不可过分 (temperatura), 所谓在绝对的对称性中有目的地、偷偷地塞入一些细微的变化”<sup>[1]</sup>.

热的反义词是冷. 关于冷, 虽然英文的冷, cold, coldness, 也在英文物理文献中时常见到, 但很多时

候用到的是其它形式的词, 比如 refrigerator (冰箱)、refrigerating machine (制冷机). 这里的冷, fri, 来自拉丁语系, 法语形容词为 froid, 西班牙语为 frío. 相应地, 冷在希腊语中为 κρύος (cryos), 是极寒冷 (chilly) 的意思, 但是在现代物理学文献中极寒冷也不足以说清楚它是多么的冷了. Cryo 出现在 cryostat (低温恒温器)、cryopump (冷凝泵) 等词汇中, 这里的冷可是由液氮或液氦维持的, cryogenic refrigerator 里的温度远比家中冰箱里的更低. 有时为了有所区别, 人们在表达“冷的”概念时会选择不同词源的词, 如冷原子物理英文为 ultracold atomic physics, 低温物理则写成 low-temperature physics, 《低温物理》杂志因为要显得很有学问, 还要写成拉丁文 physica temperaturae humilis.

在量热设备上, 文字也是比较混乱. Thermos 是“温的”, thermometer 是量温的器材, 汉译温度计; 但还有一个词为 thermoscope, 按说也是温度计, 但有人为了以示区别将之译为量温器、测温器. 其实, 这里的区别是, meter 的本意是测量, 强调刻度; scope 的本意是看, 带 scope 的测量器材强调的是观察, 可能并不要求一定落实到一个数值. 当然这话也不对, 如今遍布各地防流感的数字式红外 thermoscope 就是简单地蹦出一个数字. 显然, 人类制造的第一个量温器材只能是 thermoscope, 因为它还没有刻度. 关于 meter 与 scope, 以及 metry 与 scopy 之间的细微差别, 请参阅笔者此前的讨论<sup>[2]</sup>. 此外, 还有一类近似地利用黑体辐射性质的温度计 pyrometer, 有人将之翻译成高温计. 这个翻译有点过, 因为有些 pyrometer 也只是用来监视人类的体温变化 (见下文). 测量热量的设备是 calorimeter, 汉译量热计, 用于测定化学反应、状态变化或溶解过程所产生的热量.

### 3 温度的物理

温度是物理学中七个基本量之一, 单位为 Kelvin, 以英国物理学家 William Thomson 的官爵, 即 Lord Kelvin 命名. 在许多物理学生的头脑里, 温度是个最基本的物理量, 一个可测量量. 1994 年夏季一个无聊的下午, 笔者在德国 Kaiserslautern 大学物理系图书馆翻阅一本名为《Heat Transfer》的书时, 忽然明白温度是不可测量的. 它的所谓测量

4) 大意是: 可否将你比作晴朗的夏日? 你却是更加秀丽、温婉! 此诗流传的汉译被称为再创作, 已与翻译无关. ——笔者注

都要依赖一个我们未明说的、有时甚至是根本不知道的某个物理学定律,且测量的是其它的可测量物理量.而即便不知道那个定律我们依然能够制造温度计并籍此逐步地建立起热力学,则是在笔者为中国科学院研究生院准备 2009 暑期课程时才认识到这一点的,此时笔者在大学和研究所已经混了 27 个年头.由于温度是对大粒子数体系的平衡态演生(emergent)性质作统计描述时才能引进来的一个量,笔者有时甚至想说温度就不是个物理的量;研究少体问题的物理学家基本上是发烧的时候才从护士的嘴里听到这个词的.而热力学之晦涩难懂,多半是因为这些应该明确指出而又鲜有人指出的事实.诚如 Mcgee 指出的那样,“温度是最难清晰定义的物质的一般性质(The concept of temperature has been the most difficult of the common properties of matter to define clearly)”<sup>[3]</sup>.

当我们凭借身体感知冷热从而对环境的温度做出判断时,我们更多的是在谈论一个传热学的问题.热流流向我们的身体,我们感觉是热的,我们就断言外界温度高;热流自我们身体流出,我们感觉是冷的,我们就断言外界温度低.不过这个感觉不足以要求外界有物理上严格定义的温度,且热流的强度必须被限制在一个很小的范围,过大的注入和流出的热流都可能损坏我们的感觉器官,从而得出混乱的判断.当人体,比如脚,被冻得非常厉害时,也会有热的感觉,确切地说是麻痒的感觉,且那种麻痒的感觉不是整体性的,而是如同第二类超导体内的磁通涡旋,或者半导体晶体里的位错线那样的分布.有时,即便是处于同一环境中的两个物体,假设都比我们的手冷,其中吸收热量快的物体,比如金属,也会给我们更冷的感觉.也就是说我们的手这样的温度计是依靠热流方向甚或热流的速率来判断冷暖的.一切感知温度的器件,都可能存在类似的问题,至少它不能帮助测量者断言待测体系有完好定义的温度.

热力学告诉我们,针对一个处于平衡态的体系,我们才能定义其温度为  $\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial E}\right)_{N,V} \dots$ ,即温度是由体系在粒子数、体积以及其他广延量都保持不变的前提下熵—内能关系决定的.自统计力学的观点看来,这个关系是基本(fundamental)的.虽然,温度可以作为物体冷热程度的度量(temperature is the degree of hotness or coldness of a body),但冷热(热流的方向和速率)却是更基本的,且不保证一个完好定义的温度的存在.

## 4 温度测量的逻辑基础

温度测量涉及复杂的物理现象.如何测量温度,虽然未得到充分强调,也算是一门学问(thermometry),而且是一门复杂的、困难的学问.任何尝试测量温度的人都应该清楚地了解测温的原理以及满足特定目的所采用之具体测温方法<sup>[4]</sup>.

温度测量的逻辑基础是热力学第零定律:“若体系 A 和 B 分别同体系 C 处于热平衡,则 A 和 B 之间也处于热平衡.”据说该定律是 1920 年由 R. H. Fowler 提出的,从时间上看,第零定律出现晚一些,算是对热力学三大定律的补充.既然是补充,说明有其必要,并不是如字面上那样看起来几乎是废话.所谓的热平衡,我的理解是即两体系间单位时间内、且不管多长时间间隔内的净交换热量为零.两个体系分别同第三个体系处于热平衡,细节上却可以是以不同的传热方式,以不同的单向能流交换着热能(图 1).这样,热平衡如果用热量交换的词汇来描述的话,就太不经济了.热力学第零定律首先表明此问题可以进一步引向深入,定义一个新的表征热平衡的物理量,这就是温度<sup>5)</sup>.这才是第零定律的关键.有了这个逻辑基础,温度概念的引入就显得顺理成章了,温度计的使用就得到了原理上的保障(一个测温物质同待测体系建立了热平衡,假设此过程交换的热量与待测体系的总热量相比可忽略不计,则根据测量测温物质某个物理量所换算得到的温度值可看作是待测体系的温度.当然,有些温度计不需要和待测体系建立热平衡),而且对两个独立的热力学体系,可以通过测温过程建立起温度的比较而无需要求它们之间建立热的交流.热力学第零定律同其他第零定律一样,注重的都是为该学科打下坚实的逻辑基础.

## 5 温度计与温标

我们有冷热的感觉,有将冷热量化的需求,问题

- 5) 为了给中学生讲清楚热力学第零定律是重要的定律而不是废话,我举了这样一个例子:若你同两个同学分别在交往中在财物方面基本上是有来有往的(财物往来可以表现为送小礼品、借钱、请客等等不同方式),即一段时间内往来的财物若都换算成钱的话也不亏欠谁,那么我们可以不管具体交往的细节而引入一个新的概念,家境,来描述大家的家庭经济情况.我们会说,若你的家境和那两个同学的家境差不多,则那两个同学的家境相比起来也差不多.用家境概念所作的描述比罗列小朋友之间交往的细节更经济、更有表现力、更能抓住问题的实质.这就是热力学第零定律这类看似废话的定律之威力所在.——笔者注

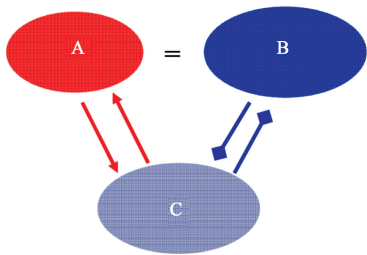


图1 热力学第零定律图示,注意不同体系之间的热平衡细节上的差异

是如何将温度量化,注意冷热是感觉而非视觉上的判断. 如果要将冷热量化为可以言说的事物,就需要一个将冷热转换成视觉效果物件,即温度计. 1594年,伽利略读到了Hero的手稿“Pneumatics”(成书于公元前一世纪),从而发明了利用气体压力(体积)随温度改变的原理、由一种液体的升降来显示冷热程度的 thermoscope(图2). 如今市面上的玩具爱情温度计就是利用的这个原理. 另有文献说伽利略1600年左右发明的 thermoscope 是这样的装置:密封的玻璃管内注入一定量的透明液体,其中浸泡着比重不同的小物件. 当温度升高(下降)时,液体的密度会减小(增加),小物件的悬浮位置就有变动(图2).



图2 原始的 thermoscopes. 左图中利用的是气压随温度的变化,观察的是液体的升降;右图中利用的是液体密度随温度的变化,观察的是固体悬浮物的升降

仅有视觉上的冲击是不够的,只有实现了对温度的粗略测量以后,温度的概念才能够被定义(…… Only after crude methods of temperature measurement were developed could the concept of temperature really be defined!)[3]. 这是科学发展的一个有趣范例,印证了关于科学是一艘行驶在大海上的船、而我们只能在这艘船上对它进行修补的比喻. 在正确地理解温度之前,我们已经有了量化温度的努力和实践. 要得到量化的温度,就要解决如何

量化以及为什么可以这样量化的问题,虽然理解后一点是“马后炮”式的.

在热力学史上,测温是从测量离我们的体温不太远的温度开始的,且都是采用线性温标,即假设测量依赖的物理量(或现象),如气、液、固体的热胀冷缩<sup>6)</sup>,随温度在感兴趣的范围内是线性变化的. 这样对两个参考点赋值就足以确定一套温标和温度计. 从1744年到1954年,0 °C<sup>7)</sup>被选为水的凝固点,而100 °C是水的沸点(习惯性的百分制思维,所以深度科学性欠缺一点),当然是在一个大气压(注意,是奥地利维也纳的大气压!)下的凝固点和沸点(图3).



图3 水的凝固点(冰水共存)和沸点分别被定义为0 °C和100 °C

与摄氏温标类似的温标还有一些. 问题是,在我们能定义和理解温度之前确立的这些温度测量的方法学(thermometry),其正确性有保证吗? 如果有,又是如何得到保证的? 注意到,温度测量利用某个可测量量  $x$  对温度  $T$  的依赖关系  $x = f(T)$ ,而这个关系先前我们是不知道的. 但是,只要该物理性质对温度的依赖是“乖的”<sup>8)</sup>,则总可以利用逆关系  $T = \tilde{f}(x)$  在某个参考点  $X_0$  附近采用物理量  $x$ ,配合关系式  $T = T_0 + \alpha(x - x_0)$ ,来测量温度. 此线性关系近似的正确性是由依赖关系  $x = f(T)$  的“乖”而不是由其具体形式决定的,这就是为什么在我们弄懂温度的物理之前就能有不错的温度计的原因. 注意到公式  $T = T_0 + \alpha(x - x_0)$  中的参数  $\alpha$  是通过

6) 有少数物质体系在某些温度范围内是热缩冷胀的. ——笔者注  
 7) 符号 °C 来自瑞典人 Anders Celsius 姓的首字母 C. Celsius 于1742年建议了这套温度标准. °C 在汉语中读作“摄氏温度”. 另有一套在航班上常听到的温标是华氏(Fahrenheit)温标. ——笔者注  
 8) “乖的”,英文为 well-behaved. 相变点或临界点附近某些物理量对温度的依赖关系就是不乖的. 典型的例子有液氦在  $\lambda$  一点的比热随温度的变化. ——笔者注

选择参考点的温度值确定的,因此这样的温标是有随意性的。

温度是冷热程度的表征,而物体之间冷热程度的差别体现在热接触时的能流收益,因此相比于温度值所表示的关系,热流才是更基本的.若我们将相互之间热平衡的系统归为一个类,处于不同的系统类按热接触时发生能量流的方向排序,能量流的方向指向温度低的体系.此时,任何能正确地给出系统类顺序的温度标签都是物理上好的温标(图4).当然,同上述我们采用的只适合于局部温区的有限温标不同,我们这里讨论的是对温度全局上的标度问题.对于温标的选择来说,给出正确的系统类序列(能流方向)是第一位的,而确立具体的数值是第二位的.要做到后一点还需要依赖其他的物理事实或规律;且根据不同规律定出的温标(scale,请不要混同于讨论摄氏温标同华氏温标不同时所涉及的温度 standards),相互之间的变换关系一般是非线性的.这样的温标很多,但我们期望一个具有某种“绝对”意义的温标,方便、或者说利于物理学获得一个自洽的面貌是我们对这样的温标的期待<sup>[4]</sup>.这样的温标应是基本(fundamental)的,即测量温度时所选取的测量量对温度的依赖关系只涉及基本物理常数而不包含任意的校准常数<sup>[3]</sup>.

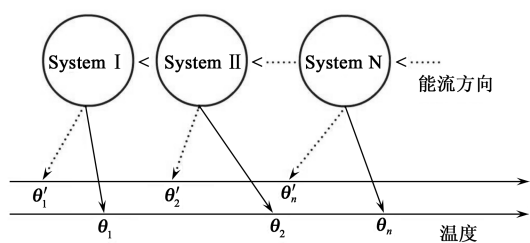


图4 平衡态体系之间热接触时能流的方向与温标的设定<sup>[4]</sup>.体系 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, \dots)$ 和体系 $(\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_n, \dots)$ 都正确地给出了平衡体系热接触时的能量方向,因此都是好的温标.它们两者之间应有相同的拓扑,但两者之间值的换算一般是非线性的.

此时,讨论一下时间和温度的一个共通的侧面是有趣的.在拥有一个可接受的温度理论之前,我们的温标和温度计是混乱的;在我们能建立起可接受的时间理论之前,也没有具有基本时标的计时器.在讨论他的广义相对论时,爱因斯坦用实在的、经典的“米尺”、“时钟”和“观察者”等概念,这是他囿于常识的地方.这样的表述有历史的因由,却是误导性的(许多人的相对论水平永远地被定格在“米尺”、“时钟”等概念上了),故为人所诟病<sup>[5]</sup>.

## 6 绝对温度与绝对温标

所谓的温度测量,一直是用某种物质体系的某个物理量,比如水银温度计中水银柱的高度,来表征温度的,其前提条件是该物理量在给定的温区内随温度单调地变化(不存在能测量所有温度的温度计).但单调性不足以确定对变化的定量描述,故历史上曾出现多种依赖不同物质的不同物理性质的,针对不同温区的温度计,曾引入不同的经验温标(standard)<sup>[3]</sup>.纷乱的温标反映的是对温度纷乱的认识和定义,这说明关于温度一定有某些深刻的物理我们还没有把握.热力学发展史上引入的经验温标虽然都满足了所采用的物理量在工作范围内随温度单调变化的要求,但物理量随温度变化的定量关系的确立显然应服务于建立一个自洽的热力学体系;哪怕仅是为了测温的统一,也需要一个独立于具体物理量的温标,使得不同的温度计可相对于一个统一的、最好是适用于所有可能出现温度值的物理体系(原理)加以校准.

1703年,法国人阿蒙东(Guillaume Amontons)发现降低温度时,瓶子里的气体压力也下降.温度越低,压力越低.但气压不可能为负,则按照理想气体的状态方程(按照理想气体方程定义的),温度降到零也就不能降了.阿蒙东推测这个温度在 $-240^{\circ}\text{C}$ .这是绝对温度的早期概念.后来,开尔文爵士引入了绝对温标,即体系所处的温度应这样取值,使得工作在 $T_1$ 和 $T_2$ 上的理想热机,其效率为 $\eta_{\text{carnot}} = 1 - T_1/T_2$ .注意,是我们选择了 $\eta_{\text{carnot}} = 1 - T_1/T_2$ 这样的简单形式的效率公式,通过对能量(流)的测量,决定了所谓的绝对温度.这个公式注定了 $T > 0$ .理想气体定义的绝对温标,和开尔文的绝对温标有相同的拓扑,且可以证明它们之间只差一个比例因子;理想气体定义的绝对温标在测度上有任意性,反映在状态方程 $pV = kT$ 存在待定常数 $k$ 的事实上.值得注意的是,开尔文绝对温标是物理学家的选择而不是物理的选择,详细讨论见文献<sup>[4]</sup>.绝对温标暗示了绝对零度不能达到,因此衡量极低温技术水平就表现为一个不断趋近于零的数字,利用激光冷却技术如今人们已经能把原子气体冷却到nK的水平了.

1900年,普朗克通过猜测的熵与内能的关系,给出了(理想的!)黑体辐射公式,即能量谱密度对温度的依赖关系 $e_{\nu} = \frac{4\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}$ <sup>[6]</sup>.这个公

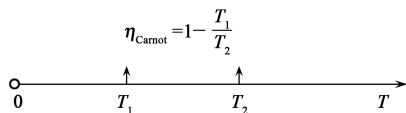


图5 绝对温标的完整图像:正半实数轴,其上测度的选择使得在温度  $T_1$  和  $T_2$  上工作的可逆热机,效率可表示为  $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_1/T_2$

式当然是严格的数学表达,对应一个温度的不再简单地是个数值,而是一个分布函数.同上述绝对温度定义一样,这里温度的确定还是通过能量测量实现的.对于具体的一个辐射体,比如宇宙<sup>9)</sup>,它的辐射能量密度谱估计不是像这个数学公式那么完美,但重要的特征(features)却不会有太大的偏离(图6).这样,我们只要将  $\nu \sim e_\nu$  曲线美化成符合上述公式的形式,就能定义一个绝对温度.宇宙背景辐射、星体温度就是这样确定的.对黑体辐射公式的近似定义了绝对温度,或者说黑体辐射理论为我们提供了一个绝对温度计的数学基础,测量黑体辐射谱的设备就成了普适的温度计,且这种绝对温度计是远程的.利用此原理的绝对温度计之一,大型射电天文望远镜(图6),为天体物理、宇宙学、引力理论的研究提供了巨大的帮助.

大型射电天文望远镜这样的绝对温度计太昂贵了,目前已有多种不太严格的——只测很窄范围内的波谱,或者其依赖的判据或计算也不严格——绝对温度计供实验室和日常生活中使用.这类温度计英文为 pyrometer.例如,有一种灯丝消失光学测温仪(the disappearing filament optical pyrometer):通过一个红色(几乎单色)的滤光窗口将待测的白炽光源和仪器内置的灯丝(校准过的)发出的辐射一起比较,当辐射源的强度和灯丝的强度一样时,灯丝的像消失了,由此可以判断辐射源的温度就是内置灯丝的当前温度.这类温度计一般用于接近  $1000^\circ\text{C}$  的高温测量,误差较大.还有一类测量红外波段发射谱或发射率(emissivity)的红外测温仪,英文为 infrared thermometer 或 infrared radiation pyrometer 或 radiometer,由于其输出是蹦出一个表示温度的数字,因此也叫 infrared thermoscope(图7).由于 emissivity 依赖于物体的温度,也依赖于物体表面的状况,因此这类温度计需要严格校准.

## 7 温度测量的假象

前述我已经阐明,温度作为一个统计性质的强度量,是不可以被直接测量的.所谓的温度测量,是

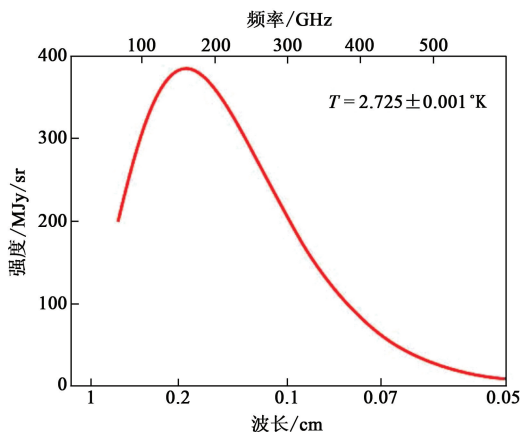


图6 绝对温度计和它的理想测量结果,即满足普朗克公式的辐射强度随波长(或者频率)的变化



图7 数字式红外 thermometer 或者 thermoscope 或者 pyrometer. 量温变成了直接读取仪器显示出的数字

通过对其它(广延)物理量(受热影响)的测量得以实现的.其它的物理现象被当作温度的指标,所得的温度值可能会因为某些事故得到不精确的、甚至错误的结果.首先要注意的一点是,物质体系受扰动后达到新的温度状态可能是需要某个特征时间的,而一个反应很快的测温装置,比如电阻温度计(resistor

9) 宇宙的背景辐射为什么可以看作是黑体辐射,我不可不懂。——笔者注

thermometer), 会瞬间就给出一个温度值而不管体系是处于什么状态. 许多研究相变的文章给出的结果之所以出入较大, 我怀疑与测温有关. 其它的错误根源包括测温点同温度计(比如热偶温度计)的探头所在地并不是原来设定的地点, 或者转换或显示部分的电路出了问题(比如热水器显示温度的电路因为水垢过早地亮灯指示水开了), 等等. 如果认定油锅冒气泡就代表高温的话还有受骗的可能(此时人的常识扮演了温度计的角色), 因为加入低温分解气化的物质, 比如硼砂, 很容易在低温下就让油锅翻腾不已. 旧社会流氓斗狠, 就有人用过这招表演下油锅.

## 8 负温度

“语不惊人死不休”并不是诗人特有的态度. 物理学家们为了博取不朽的名声, 在提出新概念的时候一样是出语惊人. 比如热力学定律强调了绝对温度零度是不可能达到的, 但如果愣达到了呢, 又或者让您误以为比它还低呢, 那该是多么轰动呀. “负温度”就是这样的一个概念. 配上像这样的句子“负温度的体系比任何正温度体系都热(Rather, a system with a negative temperature is hotter than any system with a positive temperature)”, 简直太后现代了.

其实, 所谓的负温度涉及的是激光工作介质或者磁场中分裂的核自旋这样的仅有几个能级(实际上是两个)的体系, 因为外在泵浦(pumping)的原因, 体系中的高能级以较大的比例被占据, 即出现粒子数反转(population inversion). 所以, 如果硬要用玻尔兹曼分布之类的描述, 即认定密度算符  $\rho$  由式  $\rho = \exp(-H/kT)/\text{Tr}\exp(-H/kT)$  给出的话,  $H$  是体系的哈密顿算符, 则  $T$  应取负值. 注意到粒子数反转是由外界的泵浦和能级的性质, 比如能级间的衰变速率, 所共同决定的, 假设体系有三个能级的话, 按照上述定义甚至能得到三个不同的负温度. 这当然有点尴尬. 而若将负温度限定在两能级体系的话, 直接用占据状态描述就行了, 引入一个温度参数除了新闻效应以外还能有什么益处? 类似负温度之类的概念物理学上还有一些, 读者诸君遇到时不妨一笑置之.

## 9 多单元热力学体系的温度

若一个体系虽然其整体上不是处于热平衡态, 自然用单一温度参数描述是不恰当的, 但组成它的

子系统却是各自近似地处于平衡态, 则对这样的体系可以针对子系统定义出一组温度来表征其热力学特性. 平衡态的等离子体, 如果不是太严格的话, 还有鸳鸯火锅(图8), 就是这样的热力学体系. 对平衡态等离子体, 可以根据离子能量分布和电子能量分布分别定义离子温度和电子温度. 如果也用 Kelvin 温标的话, 一般气体的离子温度, 近似地可看作是主导等离子体同环境交换热量的参数, 并不比室温高多少. 但是, 电子温度要高得多, 一般在  $10^5$  K 以上, 这样的等离子体被称为 non-thermal plasma; 若是等离子体内电子和离子是处于热平衡的, 则是 thermal-plasma. Non-thermal plasma 有人将之翻译为非热等离子体, 有人则随手使用低温等离子体这个译名. 利用激光等更具选择性的离化工具可以使得气体中中性原子和离子的温度保持很低, 比如维持在 1K 温度的水平, 这样的等离子体被称为 cold plasma 或 ultra-cold plasma.

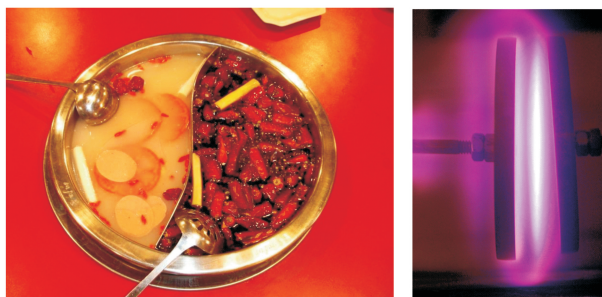


图8 鸳鸯火锅和气体放电, 典型的具有两个近似热平衡子系统的热力学体系

## 10 结束语

温度作为一个统计参数, 与其定义所依赖的统计一起才构成对体系大体上的科学描述. 看到一个温度值, 要把它同关联的物理量的分布联系起来, 这也是电子温度常常用能量单位给出的道理. 对于整体上严重分化的、非平衡的体系, 简单地给出依赖某个整体性质(热辐射的强度; 某个电阻置身其中所表现的电阻值), 错误地换算出来的温度值其实是误导性的. 这正如对贫富严重分化的社会, “算术平均”后的工资水平或消费增长速度只会掩盖社会的真实, 这种学问的出现既可能是因为某类学者学术功底之不足, 更可能是因为该类学者献身热情之过头.

本文关于温度的讨论基本上是技术层面的, 此时我特别想重温以前的一句话, 即关于任何一个物理学概念都有太多我不懂的内容. 其实温度是物

理学最关键的基本概念之一,在量子场论、抽象代数的层次上讨论温度或可触及温度内涵的皮毛.比如,绝对零度是不可达到的,但绝对零度的状态却被假设是存在的,且是量子场论处理固体以及其它物理问题时的起点,被当成某种意义上的真空态.这个处理方式引起的不仅仅是哲学的争论,还涉及一些基本物理量的深层联系.这个话题水太深,远超笔者能力之外.为免读者诸君以为我故弄玄虚,特摘抄一句供欣赏:“Temperature is the only fundamental way of getting around the problem of relativity of motion(温度是解决运动相对性难题的唯一的根本出路)”.怎么样,令人惊诧乎?

参考文献

[1] Thomas Mann, Magic Mountain, New York : Knopf , 1939  
 [2] 曹则贤.物理, 2007, 36:886 [Cao Z X. Wuli (Physics), 2007,36:886 (in Chinese)]  
 [3] Thomas D. McGee. Principles and Methods of Temperature Measurement, John Wiley & Sons ,1988  
 [4] 汪克林,曹则贤. 时间标度与甚早期宇宙疑难问题. 物理, 2009, 38 (in press)  
 [5] Philip Anderson in Brown L M, Pais A, Pippard B (Eds.), Twentieth Century Physics, IOP Publishing, 1995, 2017  
 [6] 曹则贤.物理, 2009, 38: 675 [Cao Z X. Wuli (Physics), 2009,38:675 (in Chinese)]

• 物理新闻和动态 •

雷雨云加速器

从 1994 年起,人造卫星、飞船和安装在地面的探测器都能从雷雨云中收集到  $\gamma$  射线,它们辐射的时间可保持几毫秒到几分钟.似乎只有最短的辐射是与雷雨云发生闪电有关.科学家们一直认为, $\gamma$  射线能在雷雨云的强电场下由接近光速的电子产生,因为此时的高速电子撞击大气分子后会使其速度慢化,从而辐射出  $\gamma$  射线,这就是物理上定义的韧致辐射.为了说明大量高速电子的出现,理论学家们假定初始的高速电子来源于宇宙线,它们在与大气分子碰撞中产生出一批电子,新释放出的电子再去碰撞分子,这样就形成了一个“逃逸”电子的雪崩过程.这个理论模型可以与瞬间的闪电过程相符合,但却无法解释时间比较长的  $\gamma$  射线辐射.

为了获取新的数据来深入探讨这个问题,日本 Riken 科学研究所的 H. Tsuchiya 教授和他的同事们安置了一批设备去测量从雷雨云中辐射出的电子与光子,其中主要是一组碘化钠闪烁器,它可以接收从 1 万电子伏特到 1200 万电子伏特能量范围内的高速入射粒子.闪烁器对 500 万及更高电子伏特的电子尤为敏感,因为这些高速电子可以在大气层内自由飞行几百米以上.这批闪烁器均安置于海拔为 2770 m 的 Norikura 天文台内,因为那里经常会发生低层的雷雨云.

2008 年 9 月 28 日的暴风雨夜晚,闪烁器收集到长达 90 s 的辐射粒子流,当时并没有发生闪电.计算机模拟显示,所接收到的  $\gamma$  射线可能来自于闪烁器上方 90 m 的距离.因为发射源的距离是如此短,所以雷雨云区域内的电子在获得加速后能逃逸飞行到接收器内.这些高速电子能量值的范围可扩展到 2000 万电子伏特左右,这与理论上逃逸电子模型的能量估算值比较相符.

从电子计数可推测出雷雨云加速器的长度约有 200 m.这个长度要比理论上由逃逸电子模型所预计的长度短一些.在美国新墨西哥州 Sante Fe 研究所工作的 R. Roussel-Dupre 教授(他是参与此项研究的科学顾问)认为,应该对与雷雨云有关的逃逸电子模型从理论上进行探讨,特别是对雷雨云加速器的大小与规模进行一些修正,这样才能解释实验上观察到的长时间辐射粒子流和用气球探测到的雷雨云内并不很强的电场.

(云中客 摘自 Physical Review Letters, 26 June 2009)

• 读者和编者 • 《中国大百科全书·物理学》(第二版)邮购信息

《中国大百科全书·物理学》(第二版)收条约 1700 条,图表 1400 多幅,200 多万字,精装 16 开,638 页,全彩印刷,订价 185 元.为方便《物理》的读者订阅该书,经与出版社协商,《物理》编辑部获得该书的代理发行权,并以 150 元/本的优惠价(8 折,含邮费)发行,欢迎各位读者向编辑部订阅.订购款汇款方式:

1、邮局汇款

地址:北京 603 信箱,邮编 100190  
 收件人:《物理》编辑部  
 附言:大百科全书

2、银行汇款

户名:中国科学院物理研究所  
 帐号:30948821—250101040005699  
 开户行:农行北京科院南路支行  
 又:汇款时请注明“《物理》大百科全书”

请您汇款后及时发邮件到:physics@iphy. ac. cn,告知收件人详细地址、发票抬头等详细订购信息,以便书籍及时、准确的寄到您手里.

咨询电话:010—82649029,82649266