

温度和温度计中的物理学原理*

刘全慧[†]

(湖南大学物理与微电子科学学院 理论物理研究所 长沙 410082)

2020-02-23 收到

[†] email: qhliu@hnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200310

1 温度是一个抽象但可以测量的物理量

温度是否可以测量? 没有量热仪, 没有自由能测量仪, 也没有夸克质量测量仪器等等, 但是有温度计。从计量仪器的角度上, 温度是可以测量的! 或者说在物理学的角度上, 温度是可以测量的! 另外一方面, 测量温度的时候, 测量的实际是水银柱的长度, 辐射通量等, 这些都不是温度本身。在这种意义上, 温度是一个抽象的概念, 是不能直接测量的! 这里需要一点哲学思辨。

测量温度和温度计之间的关系, 有点像吃水果和吃苹果的关系。水果是抽象的, 而苹果是具体的。水果是吃不到的, 但能吃到苹果和樱桃等。美学中也有类似的问题。尽管每个人在每个时间段的审美标准不同, 但是美是存在的, 同

时也是抽象的。尽管大漠孤烟直或者蒙娜丽莎的微笑这些具体的美感都可以捕捉并描叙, 但是美本身难以定义。黑格尔的美学思想有一个观点认为美是理念的感性显现。当然, 美是否具有客观存在是一个问题, 这一点和温度的完全客观性不同。

2 爱因斯坦和杨振宁论温度

根据考证^[1], 1624年就出现了温度计一词, 1640—1660年间出现了现代温度计的雏形。当时, 人们不清楚温度计量度的是“温度”还是“热度”, 也不知道区别温度和热。英国人 J. Black 首先区别热和温度这两个基本概念, 他生活的年代是 1728—1799 年。从温度计的出现到区别热和温度, 人类至少花费了一个世纪的时间。爱因斯坦对此有专门评述^[2]: “The most fundamental concepts in the description of heat phenomena are temperature and heat.

It took an unbelievably long time in the history of science for these two to be distinguished, but once this distinction was made rapid progress resulted.” (在描述热现象时, 最基本的概念是温度和热。在科学史中, 区别二者花费的时间难以置信得长, 不过, 知道二者的不同之后的发展迅猛。)

理解热和温度的差别, 首先需要利用已知的知识。在物理的入门处, 是牛顿力学, 如果局限在一个多世纪前的认识水平, 还可以认为牛顿力学在本质上是决定论性的。在初步的牛顿力学基础上建立热和温度的图像, 对于初学者是有益的, 这就是所谓气体分子运动论。如果分子之间没有相互作用, 分子的能量就是动能。那么, 热就是所有分子的动能之和! 分子的平均动能就可以用来刻画温度! 封闭盒子里的分子处于热力学平衡时具有相同的平均动能, 也就是封闭盒子内部处处温度一样。利用气体分子运动论, 可以建立起理想气体的热力学。

经过了一个多世纪的发展, 对牛顿力学在本质是否具有决定论性这一点有了新的理解。尽管在热学入门级教科书中还在用气体分子运动论, 但是分子运动论不能解释所有的热现象, 温度和热的概念必须脱离力学的图像。热现象的描述需要更加抽象的数学工具和物理理



图1 抗疫期间都在量体温。那么, 什么是温度?

* 国家自然科学基金(批准号: 11675051)资助项目

The so-called nano-science and technology develops rapidly. Since a nano-system contains only finite number of particles, is it so? the statistical mechanics applies? or which is fundamental, the equal probability postulate or the other law of thermodynamics? (Answer = often microscopic picture (eg = thermodynamics) can work, provided that surface terms are included.)

图2 2006年作者与P. G. de Gennes教授在火车上的交流

论, 这个工具就是概率论, 这个理论就是量子力学。

2004年12月初, 中国物理学会第八届教学委员会在清华大学组织了第一次会议, 会议请杨振宁先生就他在清华大学进行“大学物理”的教学实践作一个即席发言。杨先生使用的教材是Halliday和Resnick的*Fundamentals of Physics*。这套教材经过千锤百炼, 反复修订, 已成经典, 在世界范围内被许多大学使用。但是杨先生认为该教材有两个较严重的缺陷。第一是关于矢量的标积和矢积的定义。该书把它们几何与代数定义混为一谈, 读完后仍不知道标积在坐标变换下的变换性质。第二是该教材上没有关于绝对温度的内容。热力学第二定律中熵和绝对温度的定义是同时进行的, 缺一不可。杨先生认为后一个处理是“很大的错误”, “把物理学的精神抹杀掉了”。在讨论绝对温度的部分, 我们将回到这个问题。

3 什么是温度?

“什么是温度?”这个问题的哲学层面是一个终极问题。相当于问“Who Am I? Where Do I Come From? Where Am I Going?”(我是谁? 从何而来? 欲何往?)。这一问题如果换一个方式来问的话, 回答起来会顺

畅很多。科学家更关心的问题是: “Who Am I? Where Am I Going? And How Am I Going to Get There?”(我是谁? 欲何往? 如何达?)。热力学对温度的全部解答包含在热力学第零定律中。

热力学第零定律: 如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡, 则它们彼此也必定处于热平衡。所以, 热力学第零定律又称为热平衡定律。这里, 热平衡是一个很重要的概念。它说明, 如果两个系统达到了热平衡, 这两个系统都不会有任何宏观的改变。下面抽丝剥茧, 一层一层深挖这个定律。

第一层, 定性。存在与系统大小、材质、形状无关的量, 这个量不是几何量也不是力学量, 而是一个新的量, 用来刻画热平衡时的一个共性, 称之为温度。这是经验的总结。由此可见, 温度是宏观物质系统的一个固有属性。这个温度, 也可以称之为经验温度。

第二层, 定量。存在物态方程(equation of state), 这是热力学第零定律一个伟大而深奥的结论, 是人类智力高度创造性的产物。通过逻辑可以证明, 对于最简单的宏观系统存在如下函数:

$$T=F(p, V),$$

这里的 T 是温度。所谓最简单的宏观系统, 只有体积 V 和压强 p 两个自变量。这两个变量, 一个来自几何, 一个来自力学, 用来刻画一个宏观系统, 可以直接测量。

第三层, 实验。经验提示了固体热胀冷缩, 液体难以压缩等现

象, 当然这是不够的。给定一个温度, 宏观系统的体积 V 和压强 p 及其关系, 即函数关系 $T=F(p, V)$ 的具体形式如何? 答案依赖于科学实验。试想宏观物质系统何以亿万计? 每个系统还要经历很多过程。每一个系统, 每一个过程, 都有至少一个实验定律! 仅就平衡态的气体而言, 就有极其稀薄(理想气体定律)、实际气体(范德瓦尔斯方程)、极低温度(电子气体热容量定律)、混合气体有化学反应(萨哈定律)、混合无化学反应(分压定律)等等。实验定律的繁多使得热力学看上去非常复杂。如果摸准了脉搏, 热力学并不难。这一点暂且不论。

第四层, 理论。实验仅仅说存在物态关系 $T=F(p, V)$, 并没有直接规定这个关系的形式。因此需要一个温标, 方便的温标也行。最简便的温标是理想气体温标。这一点在下一部分详细讨论。

4 为什么统计物理中的温度是第二性的?

热力学中, 温度是第一性的! 必须首先承认温度的存在性, 然后去描述它。这和统计物理不同。统计物理中, 温度是第二性的。例如, 在微正则系综中, 熵是第一性的, 而温度是第二性的。为什么会这样? 这也是一个有哲学意味的问题。

热力学是一个唯象理论。所谓唯象, 按牛顿的说法, 即科学中仅仅需要实验研究可以测量的量之间的关系。但是, 科学的发展认为, 可以测量的量与量之间关系的最短路径, 是通过一些不可直接测量的量联系起来的。因此, 爱因斯坦认为概念需要自由创造, 而不能由经验直接构造出来。用法国数学家

Jacques Hadamard (1865—1963)的话说就是：“The shortest and best way between two truths of the real domain often passes through the imaginary one.”(实域中两个事实之间最短和最好的途径常常经过虚域)。任何原理性的物理学的分支，都包含了不可直接测量的量，牛顿力学中的拉氏量、哈氏量等就不能直接测量。热力学也是如此，其中基本的物理量有很多不能直接测量，例如嫡、自由能、焓等等。总之，热力学是一个唯象理论，但不是牛顿意义上的唯象理论，而是爱因斯坦意义上的唯象理论^[3]。

统计物理不是唯象理论，它的基础不是经验而是基本假设，既然如此，就必须首先给温度一个解释。这是为什么温度在统计物理中为第二性的原因。

很多专家相信统计物理比热力学更加基础。对此，笔者一直有疑问。2006年4月29日笔者在意大利旅行，在火车上遇到了有“当代牛顿”之称的法国物理学家 P. G. de Gennes 教授。他是“软物质”领域的开创人，曾获得了1991年的诺贝尔物理学奖。我将一个自己正在思考的问题写在纸上交给他。他沉思片刻，也将自己的答案写在纸上(图2)。

其内容翻译如下：“现在，所谓的纳米科技发展得很快。因为纳米体系仅包含有限个粒子，如 10^3 — 10^9 ，统计物理能用吗？或者说，等概率假设和热力学第零定律哪一个更为基础？”“答案：当包括了表面项以后，宏观图像(也就是热力学)常常是适用的。”

尽管我的问题是统计物理是否更加基础？但是 Gennes 教授的答案却是热力学更加普适。从 Gennes 教

授回答问题的方式可以看出，科学只能回答科学能回答的问题。

热力学和统计物理的关系如何？如果换一个角度来看这个问题，答案会比较清晰。从抽象的程度上看，统计物理比热力学要高级；从普适的程度上，热力学比统计物理要宽泛。如果非要纠结热力学和统计物理的关系，伦敦大学 Brian Cowan 教授于2019年11月27日在和笔者的通信中，有一个回答如图3所示。

其部分内容翻译如下：

统计物理与热力学的关系问题是个难题。

我原来坚持朗道观点而反对爱因斯坦观点。不过我有了一点改变。

统计物理从微观模型出发推导物质的宏观性质。由此你可以推导性质 A 和性质 B(例如气体定容和定压的热容量)。假如你做到了，你可以看到性质 A 和性质 B 之间的关系。你可能相信这个关系依赖于所采用的特殊模型。与此不同，热力学提供了这些量之间的关系，而和微观模型无关。这就是热力学的特殊威力所在。

但是，在我的这一论点中有一个细微的瑕疵，源于我相信热力学的定律可能从统计物理原理中推导出来。(其他人可能争辩说不是推导，而是一种可以接受的推理)。

其中提到的朗道观点和爱因

Dear Professor LIU Quanhui:
.....
The question of the relationship between Statistical Mechanics and Thermodynamics is a difficult one. My position used to be that I adhered to the Landau view as opposed the Einstein view. But I have changed a bit from this: Statistical Mechanics derives macroscopic properties of matter from microscopic models. Thus you might derive property A and property B (for example the heat capacity of a gas at constant pressure and at constant volume). If you do that you will see the relationship between property A and property B. And you would believe that this relationship relied upon the specific microscopic model adopted. By contrast Thermodynamics provides relationships between such quantities that are independent of microscopic models. This is the special power of Thermodynamics. But there is a slight flaw in my argument since I believe that the Laws of Thermodynamics may be derived from Statistical Mechanics principles. (Others might argue that these are not derivations, but plausibility arguments).
.....
Best wishes
Brian Cowan.
.....
Brian Cowan
Professor of Physics
Royal Holloway University of London
Egham Hill, Egham
Surrey, TW20 0EX, UK

图3 2019年 Brian Cowan 教授给作者的来信

斯坦观点，可参见 Brian Cowan 教授的著作^[3]。

5 什么是温标、理想气体温标和黑体辐射温标？

对于一个具体的物质，如果已知了温度和物态参量之间关系的实验定律，也就是物态方程 $T=F(p, V)$ ，就知道物质的测温属性，然后参照某个国际统一标准校准刻度之后，就是温度计。这里最关键的还是物态方程 $T=F(p, V)$ 。

以气体为例，实验发现，所有气体在压强很小的时候，满足同一个实验定律，即玻意耳定律：在密闭容器中的定量气体，在恒温下，气体的压强和体积成反比关系。数学形式是：

$$pV=f(t).$$

这里有四个问题没有解决。

第一，这里的温度 t 和 p, V 之间的关系明确但不精确。有一个简

单的约定就是, p , V 和温度 t 之间仅仅相差一个常数, 即

$$pV=Ct.$$

换言之, 就是把 pV 本身当成对温度的一种刻画。

第二, 值得探讨温度 t 和第零定律定义的温度 T 的关系。 $pV=Ct$ 给出的是计量温度的一种方式, 即理想气体温标! 然后, 通过另外一个实验定律即阿伏伽德罗定律给出这个常数是摩尔数 n 乘以阿伏伽德罗常数 R 。故可以获得理想气体状态方程:

$$pV=nRt.$$

毫无疑问, 没有任何原理排除用定义温度 t' 的如下计量方式:

$$pV=Ct',$$

这样定义的温标 t' 可以作为理想气体温标的第二类定义! 类似, 完全可以给出第三、四类定义, 等等。这些定义都没有必要。计量温度, 必须尽可能大众化, 时髦的说法是扁平化。因此人为约定取其简单者就可以了, 理想气体温标 $t=pV/nR$ 无疑最为简单。

第三, 理想气体温标如何进行刻度? 把温度单位选定为水的三相点温度的 $1/273.16$, 这就可以刻出一度一度的温度来, 即刻度。有了刻度, 还需要规定或者标度出零度的位置, 简称标零。摄氏温标规定, 零度的位置选择为 273.15 (理想气体温标)度:

$$t_s=t-273.15.$$

水的三相点的温度是 0.01 摄氏度。注意, 此时还没有绝对温标的概念。

刻度和标零这两个过程中, 需要一个存在性定律: 水的三相点的温度与经纬度、气候、失重与否等外部环境无关, 是一个不变量。这一点也是实验规律。没有这个规律, 北京地区冬天制作出来的温度

计, 在长沙的夏天使用时, 给出的温度的准确性就会存疑。

第四, 理想气体温标是从理想气体出发的, 这不够抽象。要证明它能脱离理想气体而存在, 需要绝对温标。要证明这一点, 还有两步要走。第一步, 需要证明绝对温标的存在性, 这个温标和具体物质的特性无关。这一步需要新的原理, 即热力学第二定律。第二步, 如果用同样的刻度和标零之后, 理想气体温标和绝对温标相同。

据说当年的 CUSPEA 考题中有一道面试题如下: 如何测量太阳表面的温度? 这个问题的答案是, 用黑体辐射的通量计就可以了。黑体辐射是理想的电磁辐射, 满足一个实验定律, 即所谓斯特藩—玻尔兹曼定律: 一个黑体表面单位的辐射通量和黑体温度的四次方成正比。而这里的比例常数, 称之为斯特藩常数。这个温标就是黑体辐射温标, 可以证明, 经过合理的刻度和标定零点之后, 这个温标也就是绝对温标。测得了太阳的辐射通量, 就可以求出太阳表面的温度。

在具体的应用中, 不同的温度环境和温度区间, 需要用到不同的温度计。有些温度计可能非常复杂, 体积也可能很庞大, 测温属性的物理原理也各有不同。

6 什么是绝对温度? 什么是绝对温标?

物理学的基本原理不能依赖于具体的物态方程。尽管温度是宏观物质系统的一个固有属性, 但是温标和具体物质有关, 这不够纯粹!

温度的定义是普适的, 不依

赖于具体的物态方程。但是计量温度, 需要了解具体物质系统的物态方程。因此, 就有水银温度计、气体温度计、黑体辐射温度计等等。热力学理论的惊人后果之一是, 从理论上可以证明, 存在这样一个温标, 这就是绝对温标, 又称为热力学温标。绝对温标, 就是温度度量时和具体物质特性无关的一种温标。这一温标的存在性的证明需要用到热力学第二定律。

温标可以脱离具体物质的测温属性而存在, 深入地揭示了宏观物质系统更基本的性质, 我们把绝对温标标示的温度称之为绝对温度。

杨振宁先生提醒我们, 应该强调绝对温度 T 和熵 S 必须同时定义。下面我们看看道理何在。对于任何一个无限小的可逆过程, 可以吸收热量 dQ_r 。问题是, dQ_r 不是数学上的全微分! 两个状态间的积分值是一个依赖路径的量。这不太好! 能不能通过 dQ_r 构造出一个数学上的全微分? 如果成功, 就能给出一个普适的量, 一个不变量。理论上可以证明如下结果:

$$dS=dQ_r/T,$$

这里的 dS 就是一个全微分, S 即熵, 是一个状态参量, T 就是绝对温度。换言之, S 和 T 同时存在。

可能是为了方便教学, 现在的教科书常常没有同时定义绝对温度和熵。而是首先引入绝对温标, 然后再在深挖绝对温标定义的时候, 引入熵的概念。细究这种教学过程, 并没有否定熵的引进伴随着绝对温度, 不过把“同时定义”暗含在推理过程中, 而没有明显说明。在杨先生看来, 必须明显地指出来。为什么?

绝对温度不仅仅体现温度是宏观物质系统的一个固有属性，而且是一种绝对的存在。这一点，很像牛顿时空中的时空观的绝对性。热力学温度的这种绝对性，超越了热力学第零定律中引入的经验温度。绝对温度的存在，和任何具体物质系统无关，具有超然地位。根据热力学第三定律，绝对零度无法达到。这一定律具有一个非常深刻的后果：没有辐射也没有物质的所谓

绝对虚无的真空是不存在的。因此，热力学第三定律不仅为量子场论中的真空涨落，甚至也为引力场、暗物质、暗能量留下了后门。

7 结语

温度是宏观物质系统的一个固有属性，是经验的总结；温标是温度在物态方程中的具体显现，需要人为规定。绝对温度揭示了宇宙间

一种绝对的存在，绝对零度是一种理论的真实。

参考文献

- [1] Longair M 著. 向守平, 郑久仁, 朱栋培等译. 物理学中的理论概念. 中国科技大学出版社, 2017
- [2] Einstein A, Infeld L. The Evolution of Physics. New York: Touchstone, 2008
- [3] Cowan B. Topics in Statistical Mechanics. London: Imperial College Press, 2005

新书推荐

内容简介：诺贝尔奖获得者朗道院士为理论物理学作出了巨大贡献。他发表了一系列出色的论文，编写了被世界各国广泛使用的十卷本《理论物理学教程》，开创了极具影响力的朗道学派，该学派的代表人物如今活跃在这一学科各个领域。

这位伟大的物理学家还创立了一个关于应该如何生活的“幸福公式”，这一理论同样具有非凡的意义。朗道不仅“教书”，而且“树人”。有些年轻人对自己的命运漠不关心，对形势缺乏判断，缺乏追求幸福的渴望，对此朗道感到十分气愤。他的劝导充满了能量，能够振奋人心、让人告别懒惰，激发他人对于生活和工作的渴望。

这是第一本中文朗道传记，作者是朗道夫人的甥女迈娅·比萨拉比。与以往介绍朗道的文章大都着重其科学成就和学术风格不同，本书更多的从

个人生活角度揭示了朗道管控自己和追求幸福的方式，可以帮助了解朗道其人及其学派，大为提升学习《理论物理学教程》的兴味。

推荐理由：本书是苏联最伟大的理论物理学家朗道的第一本中文传记。中科院郝柏林院士生前为该书作序。首先，作者对于朗道太熟悉了（朗道是她的二姨夫），把发生在朗道身上的所有重要事情都讲了。其次，文字很朴实，译文也好得让人觉得这是一位朋友在讲述他身边的故事，太容易上瘾了。第三，珍贵的历史图片很多，还把朗道拍得那么帅。第四，纸张考究，装帧精美，排版讲究。第五，译文对物理内容翻译准确，译者是俄语专业的，不是搞物理的，但是显然受到了一些物理大拿的操控，想挑剔也不容易。

读者和编者

