

# 黑洞温度的奇异特性——量子温度

薛 国 良

(河北大学物理系)

## 摘 要

从经典理论看来,黑洞温度只能是绝对零度。只有考虑了黑洞的量子效应之后,黑洞才具有以视界引力加速度所标志的确定温度值。本文讨论了黑洞温度的这一奇异特性。

温度是一个古老的物理概念,随着物理学的发展,温度的概念也在不断拓广。黑洞物理学的研究表明,黑洞的温度具有十分奇特的性质,是一种“量子温度”。本文就此问题作一讨论。

## 一、令人困惑的黑洞温度

在恒星生存的晚期,随着其内部温度的降低,引力将会成为一个主导因素,这时这颗恒星就开始坍缩。当恒星质量超过中子星质量的上限时,这颗恒星将坍缩成为黑洞。经典广义相对论认为,黑洞的引力场非常强,使任何靠近它的东西都被它捕获,并且再也不能从它里面逃逸出去,甚至连光也不能发射出去。

如果在此基础上来考察黑洞的温度,那么结果是不可思议的。根据热力学第零定律,温度是系统达到热平衡时所具有的一种宏观性质,而热平衡是一种动态平衡。两个处于热平衡的物体  $A$  和  $B$ ,虽然温度相同,但是两者之间仍有能量的交换,只是单位时间里从  $A$  传到  $B$  的能量,等于从  $B$  传到  $A$  的能量,所以总的效果应当是  $A$  和  $B$  的温度都不变化。以此类比,如果一定温度的黑洞也能与具有同样温度的其它物体达到热平衡,那也就必须有单位时间内从物体传给黑洞的能量等于单位时间内从黑洞传给物体的能量这一结论。然而,经典理论认为,不可能有任何物质(亦即能量)从黑洞里出来,这就

与热平衡的概念发生了矛盾。根据黑洞的“只进不出”的性质,如果黑洞有温度的话,它只能永远是绝对零度。

为了解决上述问题,看来应当深入探讨黑洞温度的涵义。温度是热力学第零定律的产物,要做到这一点,首先要有一条类似于热力学第零定律的新定律,这就是所谓的“黑洞热力学第零定律”。

## 二、黑洞热力学第零定律

黑洞热力学是 J. D. Bekenstein 在 S. W. Hawking 的“黑洞视界面积不减定理”与热力学中的“熵增加原理”的相似性的启发下建立的<sup>[1]</sup>,其中第零定律指出:一个稳态黑洞的视界上的引力加速度处处相等。

可以看出,它类似于热力学第零定律所表述的物理内容——处于热平衡的热力学系统的温度处处相等。其中黑洞视界上的“引力加速度”与热力学系统的温度相当。Bekenstein 由此定义黑洞的温度与黑洞视界上的引力加速度  $g$  成正比,其表达式可写作<sup>[2]</sup>

$$T_{\text{H}} = \frac{\hbar}{2\pi c k} g, \quad (1)$$

式中  $\hbar$  是普朗克常数,  $c$  为光速,  $k$  为玻耳兹曼常数。

如上定义了黑洞温度之后,黑洞热力学第零定律还可以进一步表述为人们所熟悉的形

式: 稳态黑洞视界上的温度处处相等。

### 三、量子温度

考察黑洞温度的表达式(1)式可以发现,  $T_{\text{H}}$  与普朗克常数  $\hbar$  成正比, 而这正是黑洞温度的与众不同之处。

量子论表明, 普朗克常数作为“作用量子”, 它实际上可看作一种判据<sup>[3]</sup>: 任何系统, 如果它的具有[作用]量纲的物理量的大小可以与  $\hbar$  相比较时, 则这个系统应该用量子力学来描述; 反之, 如果一系统的具有[作用]量纲的物理量比  $\hbar$  大很多, 或者  $\hbar$  相对于这样的系统很小以致于可认为  $\hbar \rightarrow 0$  时, 该系统就可以用经典力学来描述。黑洞温度正比于  $\hbar$  这一结果表明, 黑洞的温度概念有着深刻的量子论的根源。如果忽略黑洞的量子效应, 即令  $\hbar \rightarrow 0$ , 则由(1)式可知, 黑洞的温度只能处于绝对零度, 前面关于黑洞温度所产生的困惑, 其根源就在于此。换言之, 要想赋予黑洞温度有意义的结果, 则必须从量子论出发来考虑问题。因此, 在这个意义上说, 黑洞的温度应当是一种量子温度<sup>[4,5]</sup>。

对黑洞进行的量子论的考察是由 Hawking 完成的<sup>[6]</sup>。1974年, Hawking 研究了坍缩中的恒星正在形成黑洞时的量子效应, 他发现, 黑洞象一个黑体一样具有以温度

$$T_{\text{H}} = \frac{\hbar}{2\pi c k} g$$

所标志的热辐射(称为 Hawking 辐射)。以后

人们进一步发现, 不仅正在坍缩中的黑洞, 而且完成坍缩后的永久黑洞也具有完全相同的 Hawking 辐射<sup>[7]</sup>。Hawking 辐射的机制可简述如下。

根据量子场论, 真空有涨落现象, 即真空中会不断出现虚正反粒子对的产生和湮没。在通常情况下, 这些虚粒子不会物质化。但是, 当引力场存在特别是当有黑洞时, 情况就不同了。这时黑洞附近的真空涨落产生的虚正反粒子对, 有可能变化为实正反粒子对, 其中负能粒子通过隧道效应进入黑洞, 使黑洞的能量减少; 而其中的正能粒子则可能向外穿出黑洞的外引力区, 这相当于黑洞辐射了一个粒子。

Hawking 的发现确认了黑洞温度的量子特性: 当考虑到黑洞的量子效应时, 黑洞的热力学温度不是绝对零度而是  $\frac{\hbar}{2\pi c k} g$ , 而且黑洞辐射粒子的行为就和同一温度下的黑体辐射完全一样。这也说明, 黑洞的温度与视界引力加速度绝不仅仅是形式上的类比, 它们是完全相同的物理量, Bekenstein 所引入的黑洞温度就是通常热力学意义上的温度。

- [1] J. D. Bekenstein, *Phys. Rev. D*, **7**(1973), 2333.
- [2] 刘辽, 大学物理, No. 2(1983), 21.
- [3] 汪志诚, 热力学统计物理, 人民教育出版社, (1980), 183.
- [4] J. D. Bekenstein, *Phys. Today*, **33** (1980), 24.
- [5] 刘辽, 广义相对论, 高等教育出版社, (1987), 356.
- [6] S. W. Hawking, *Nature*, **248**(1974), 30; *Commun. Math. Phys.*, **43**(1975), 199.
- [7] 刘辽, 广义相对论, 高等教育出版社, (1987), 386.

## 1989 年第 6 期《物理》内容预告

纪念核裂变现象发现五十周年(钱三强);  
核裂变物理五十年发展概况(卓益忠);  
五次对称性及 Ti-Ni 准晶相的发现与研究(郭可信);  
高压下的同步辐射 X 射线衍射研究(查长生);  
飞秒光脉冲的产生、放大和压缩(孟绍贤);  
向列液晶中的指向波研究(诸国桢);  
电子束加工在工业中的应用(马瑞德等);  
应用低温等离子体改善材料的粘结性能(张厚先等);

毫微晶材料的结构和性能(李宗全等);  
计算机控制的扫描隧道显微镜(黄桂珍等);  
半导体电子态理论简介(I)(夏建白);  
 $\alpha$  射线在磁场和电场中偏转的早期实验(杨懋沧等);  
对“卡诺制冷机的最佳制冷系数与制冷率间的关系”一文的不同意见(李继坤);  
隆重的纪念, 忠实的记录——评“原理”——时代的巨著。