

负绝对温度系统的相对性*

王西明

(咸阳师范学院 物理系, 陕西 咸阳 712000)

[摘要] 从热力学系统引出负绝对温度的概念后,以激光器的工作原理为例,研究了能量 E 、绝对温度 T 和熵 S 之间的关系,并在此基础上讨论了负绝对温度的相对性问题。

[关键词] 激光; 能量; 熵; 负绝对温度

[中图分类号] O414.11

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)04-0194-03

负绝对温度现象是美国 Rurcell 等在 LiF 晶体的核自旋系统的研究中最先发现的^[1]。后来, Ramsey 第一次提出了负温度系统的概念^[1]。负温度概念提出以来,在核自旋、顺磁电介质、量子放大器、激光放大器和核磁共振法等研究中取得了很大成就^[1-7]。负温度概念是热力学概念的推广概念,它和热力学第二定律及熵概念关系密切,用负绝对温度相对性及熵概念来研究宇宙的起源、白矮星、黑洞等物理现象正在进展之中^[8-12]。本研究试图通过对激光发光原理的分析来揭示负绝对温度系统相对性问题,以期对负绝对温度系统相对性的理解提供依据。

1 负绝对温度系统

热力学系统的绝对温度可表示为

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad (1)$$

式中, U 和 S 分别是系统的内能和熵, V 为体积。该式表明在体积不变时内能随熵的变化率等于绝对温度。一般的热力学系统具有无穷多个能级。随着内能增加(温度升高),分布在高能级上的粒子数也随之增加,由此引起粒子能级范围的增大,系统的无序性增大,熵也增大。即当 $dU > 0$ 时,一般有 $dS > 0$, 因此,由(1)式给出的绝对温度为正值。

当系统的内能增加时,系统的有序性增加,而熵减少,即当 $dU > 0$ 时, $dS < 0$, 则由(1)式给出的绝对温度为负值。可以证明,对于有限个数目的能级系统,就有可能存在负温度。

考虑一种最简单的情况,设系统有两个能级 E_1 和 E_2 ($E_2 > E_1$)。由 Boltzmann 分布有

$$N_1 = \frac{N}{Z} e^{-E_1/KT}, \quad (2)$$

$$N_2 = \frac{N}{Z} e^{-E_2/KT}. \quad (3)$$

式中, K 为玻尔兹曼常数; N 为系统的总粒子数; Z 为配分函数; N_1 和 N_2 分别是处于 E_1 和 E_2 能级上的粒子数。这时

$$Z = e^{-E_1/KT} + e^{-E_2/KT}, \quad (4)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/KT}. \quad (5)$$

当系统的绝对温度为零时 ($T = 0^+ K$), 粒子都处在最低级上,系统的总能量 $E = N E_1$, 熵 $S = 0$ 。当系统温度升高到无穷大 ($T \rightarrow +\infty$) 时, $N_1 = N_2 = \frac{N}{2}$, $E = \frac{N}{2} (E_1 + E_2)$, 系统的无序性增加,熵达到最大,绝对温度为正值^[6,7]。

如果有可能实现粒子数反转 ($N_2 > N_1$), 则由(5)式可见,这时的 T 只可能取负值。将(5)式改写成下式^[4]

$$T = \frac{-(E_2 - E_1)}{K \ln(N_2/N_1)}, \quad (6)$$

其物理意义更明显。

因 $E_2 - E_1 > 0$, 所以,如果 $N_2 > N_1$, 则由式(6)得到绝对温度为负值^[7]。

从内能和熵的角度也可得到同样的结果。若内能增加 ($dE > 0$), 粒子便向高能级集中,粒子分布的有序性增加,熵减少 ($dS < 0$), 所以 $T < 0$ 。当全部粒子集中到高能级 E_2 时,内能 $E = N E_2$ 达最大,熵达最小 $S = 0$, 绝对温度 $T \rightarrow 0^-$ 。在 E_1 和 E_2 能级之间,温度的变化区间是 $(0^+, +\infty)$, $(-\infty, 0^-)$, 温度的

* [收稿日期] 2003-01-16

[作者简介] 王西明(1958-),男,陕西泾阳人,副教授,主要从事凝聚态物理研究。

变化过程是 $T = 0^+$ 到 $T = \pm \infty$, 再从 $T = -\infty$ 到 $T = 0^-$ 。

2 负绝对温度系统的相对性

2.1 粒子数反转与光放大

设有激光器的某工作物质, 在热平衡状态下, 根据 Boltzmann 分布律, 处于高能级上的粒子数 N_2 总是小于低能级上的粒子数 N_1 , 即 $N_1 > N_2$ 。当一束光射入该物质的能级系统时, 存在着两个过程: 受激吸收和受激辐射, 两个过程互相竞争。当热平衡被破坏时, 有可能使处于高能级上的粒子数 N_2 大于低能级上的粒子数 N_1 , 即 $N_2 > N_1$ 。实现一种粒子数的反转分布, 简称粒子数反转。这时受激辐射占优势, 表现出宏观上的光放大^[13]。

2.2 工作物质中反转分布的实现

图 1 为激光器工作物质的三能级系统, E_1 为基态, E_2 和 E_3 为激发态, 其中 E_2 为亚稳态, 粒子在 E_2 上的寿命比在 E_3 上长得多。一般激发态的寿命在 $10^{-11} \sim 10^{-8}$ s, 而亚稳态的寿命长达 10^{-3} s, 甚至 1 s。

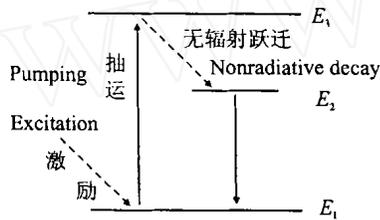


图 1 激光器三能级系统

Fig. 1 Laser three-level system

在外界能源的激励下, 基态 E_1 上的粒子被抽运到激发态 E_3 上, 因而 E_1 上粒子数减少。由于 E_3 态的寿命很短, 粒子将通过碰撞很快地以无辐射跃迁的方式转移到亚稳态 E_2 上。因为 E_2 态寿命较长, 其上积累了大量粒子, 即 N_2 不断增加。一方面是 N_1 减少, 另一方面是 N_2 增加, 以致 N_2 大于 N_1 。于是实现了亚稳态 E_2 与基态 E_1 间的粒子数反转分布。当有外来光讯号输入时, 其中频率为 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 的成分就被放大^[14]而产生激光。

2.3 E, T 和 S 之间的关系

前面讨论过, 如果二能级系统实现了粒子数反转, 能量 E 和绝对温度 T 就有图 2 所示的关系^[4]。在激光器工作物质系统中, E_1 是基态, 对应于 $T_1 = 0^+$ 状态; E_2 是激发态, 对应于 $T_2 = 0^-$ 状态。在 E_1 和 E_2 的中间对应着 $T = \pm \infty$ 的绝对温度状态。将图 2 转化成图 3, 就得到 $E-S$ 关系。

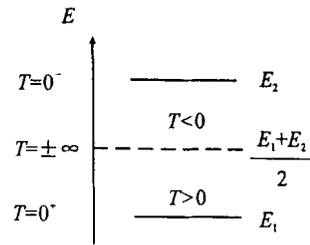


图 2 二能级系统 $T-E$ 图

Fig. 2 Picture of two-level system $T-E$

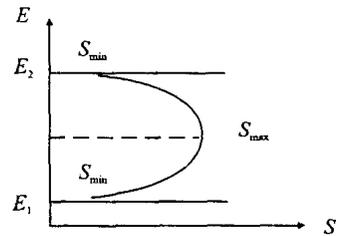


图 3 二能级系统 $E-S$ 图

Fig. 3 Picture of two-level system $E-S$

由图 2 和图 3 可以看出, 从 E_1 到 E_2 可以分成两个区域, 即正温区和负温区。从正温区向负温区过渡的过程中, 能量 E 由 E_1 到 $(E_2 + E_1) / 2$ 到 E_2 变化, 呈单调上升; 熵 S 由 S_{min} 到 S_{max} 到 S_{min} 变化; 而绝对温度 T 却由 $T_1 = 0^+$ 到 $T = \pm \infty$ 到 $T_2 = 0^-$ 状态变化。粒子的受激吸收过程是从 $T = 0^+$ 向正绝对温度系统的高温区前进, 穿过无限高温 $T = \pm \infty$ 区, 继续向负绝对温度低温区前进, 最终到达 $T = 0^-$ 状态, 出现新的有序。从能量角度讲, 粒子一直从低能级跃迁到高能级。而受激辐射过程与之相反。

2.4 三能级系统和绝对温度的相对状态

在激光器中实际具有三能级以上系统的工作物质才能实现粒子数反转^[13, 14]。图 4 是三能级系统工作物质的 E, T, S 关系示意图。

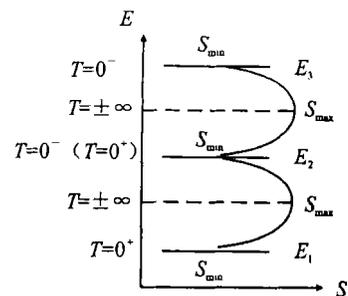


图 4 三能级系统 E, T, S 图

Fig. 4 Picture of three-level system E, T, S

图 4 中, E_2 为亚稳态, 粒子数反转一般发生在 E_1 和 E_2 能级间。在 E_1 和 E_2 之间, E_1 对应着 $T = 0^+$ 状态, E_2 对应着 $T = 0^-$ 状态。温度的变化是从 $T = 0^+$ 到 $T = \pm \infty$ 到 $T = 0^-$, 熵 S 由 S_{min} 到 S_{max} 到 S_{min} 。

S_{\min} 变化^[6,7], 特别是此时, E_2 对应着负绝对温度状态。

对于 E_2 和 E_3 能级, 如果它们之间存在着粒子数反转, E_2 上粒子数相对 E_3 上粒子数为零时, E_3 对应着 $T = 0^-$, E_2 却对应着 $T = 0^+$ 状态, 温度也是从 $T = 0^+$ $T = \pm$ $T = 0^-$ 变化。或考虑更一般的情况, 无论 E_2 和 E_3 间能否实现粒子数反转, E_2 都对应着正绝对温度状态。

从以上分析可以看出, 当激光器的工作物质为三能级系统时, E_2 能级所处的温度状态具有相对性, 在 E_1 - E_2 能级之间, 一般处于负的温度状态下, 而在 E_2 - E_3 能级之间, 一般处于正的温度状态下。同样, 对于四能级系统的激光器, 必然有两个中间能

级处在具有相对性的温度状态下。这种温度状态的相对性为从负温度概念入手深入研究激光原理提供了新的思路。

3 结 语

Ramsey 通过公式(1)借用“温度”一词^[6], 创立了“负绝对温度”概念。负绝对温度现象存在于许多远离平衡的非平衡系统中, 它主要是对粒子处于一种新的分布状态的描述^[15,16]。对于在宇宙诞生、天体演化和其他一些自然现象中, 只要存在着诸如激光等的能量有界且能级有限的系统, 必然会存在着处于相对温度状态下的能级。负绝对温度系统相对性的研究将在这一方面起着重要作用。

[参考文献]

- [1] Norman F R. Thermodynamics and statistical mechanics at negative absolute temperature[J]. Physical Review, 1956, 103(1): 20- 28
- [2] Warren G P. Negative absolute temperature[J]. Scientific American, 1978, 239(2): 90- 99
- [3] 郝柏林, 于 录. 统计物理学进展[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 411- 418
- [4] 邓锡铭, 雷仕湛. 激光技术[A]. 蔡 枢. 大学物理[C]. 北京: 高等教育出版社, 1996. 28- 30
- [5] 徐龙道. 负温度[A]. 王竹溪. 中国大百科全书(物理学)[C]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987. 364- 365
- [6] 宋德明. 负绝对温度系统的热力学性质[A]. 卢 捷. 力学热学专辑[C]. 北京: 对外贸易教育出版社, 1987. 307- 311.
- [7] 苏汝铿. 温度、负温度、温标[A]. 卢 捷. 力学热学专辑[C]. 北京: 对外贸易教育出版社, 1987. 300- 306
- [8] 邓昭镜. 系统的能谱、温度和熵的演化[J]. 西南师范大学学报, 2002, 27(5): 794- 805
- [9] 邓昭镜. 白矮星系统[J]. 西南师范大学学报, 2002, 27(6): 991- 995
- [10] [英]史蒂芬·霍金. 膜的新奇世界[J]. 物理, 2003, 32(1): 1- 4
- [11] [美]理查·摩里斯. 探索无限[M]. 吕爱华, 王 克, 译. 北京: 华夏出版社, 2002. 240- 268
- [12] [英]罗杰·彭罗斯. 皇帝新脑[M]. 许明贤, 吴忠超, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1989. 350- 431.
- [13] 顾恩普, 赵华正, 史家启. 光学[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1986. 420- 428
- [14] 赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000. 296- 310
- [15] 钱学森. 现代科学技术和科技政策[M]. 北京: 中央党校出版社, 1991. 162- 167.
- [16] 杜婵英, 漆安慎. 非线性非平衡系统的自组织[A]. 蔡 枢. 大学物理[C]. 北京: 高等教育出版社, 1996. 151- 170

The relativity of negative absolute temperature system

WANG Xi-ming

(Department of Physics, Xianyang Normal College, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: The paper draws the concept of negative absolute temperature from thermodynamic system, studies the relationship between energy, absolute temperature and entropy in accordance with operating principle of laser and on the basis of which, the relativity of negative absolute temperature is discussed

Key words: laser; energy; entropy; negative absolute temperature