

量子力学新进展

第五辑

Recent Progress in Quantum Mechanics
Fifth Volume

龙桂鲁 邓富国 曾谨言 主编

Long Guilu Deng Fuguo Zeng Jinyan

清华大学出版社

量子力学新进展

第五辑

Recent Progress in Quantum Mechanics
Fifth Volume

龙桂鲁 邓富国 曾谨言 主编

Long Guilu Deng Fuguo Zeng Jinyan

清华大学出版社

北京

1900年12月14日,普朗克教授在柏林亥姆霍兹研究所召开的德国物理学会年会上宣读了划时代论文《论正常光谱能量分布定律》,提出了能量量子化的概念,并由此从理论上导出了他在此前不久所发现的与实验非常符合的黑体辐射定律,从而创立了量子论。后经过爱因斯坦、海森堡、薛定谔、玻恩、约当和狄拉克等一批杰出物理学家的努力,建立了现称之为量子力学的理论体系。20世纪,量子力学相继应用于基本粒子、原子核、原子和分子、固体和液体等各种物理系统,都取得了巨大的成功。可以毫不夸张地说,20世纪的科学是量子力学的科学。

历史上,以爱因斯坦和玻尔为代表的两方,在量子力学的基本问题上展开了激烈的论争,这种论争对量子力学的发展起到了巨大的推动作用。但由于争论的关键问题在当时无法用实验检验,长期以来争论一直停留在思辨性的层面上。近年来,一方面由于实验技术的进展,关于量子力学基本概念的一些论争已经可以用实验来直接检验,另一方面由于量子信息科学的发展,重新激发了人们对这些问题研究的热情。现今这些基本问题不再是局限于少数几个科学天才的论争,而是具有巨大的应用潜力。由于量子计算机的潜在的巨大能力,西方发达国家投入了大量的人力和物力开展研究,从而使这一领域得到了迅速发展。1935年爱因斯坦等为反驳量子力学的哥本哈根诠释而提出的EPR佯谬中所指出的量子力学的奇特性质即纠缠态所展现的非局域关联,现在已经被实验证实,并且在量子信息、量子计算、密集编码、量子离物传态等方面得到了广泛的应用。

回顾过去一个世纪,在量子力学的创始阶段,我国正处于帝国主义列强侵略和军阀混战的贫穷落后时期,民不聊生,根本谈不上科学研究。解放后,在文化大革命的十年动乱期间,我们又失去了许多发展良机。改革开放后我国的经济取得了持续高速的发展,特别是最近党和国家实施科教兴国的战略方针,我

们具有了前所未有的发展条件。相信我国的科学家一定会在量子力学这一新的发展阶段中作出重要的贡献。

这套量子力学新进展系列专辑从多个角度对量子力学的最新发展进行了专门的评述和介绍。这套专辑对于量子力学的研究和教学有重要的参考价值。相信它们对从事量子力学和量子信息研究的广大科技人员、研究生和高年级本科生会起到帮助作用。

适逢《量子力学新进展》出版之际,特写以上数语,与大家共勉。



清华大学校长
中国科学院院士
2003年1月11日

1 量子信息启发的量子统计和热力学若干问题研究	孙昌璞 全海涛 董 辉	1
摘要		1
1.1 引言		2
1.1.1 量子热力学		2
1.1.2 从热力学角度看计算的物理极限		3
1.1.3 量子计算集成中的多体问题与量子相变		4
1.2 量子热力学的基本观念		5
1.2.1 热力学第一定律的量子力学描述		6
1.2.2 热力学基本过程的量子力学推广		7
1.2.3 量子 Jarzynski 等式		9
1.3 量子热机的微观模型 I ——平衡态情形		12
1.3.1 量子卡诺热机循环		13
1.3.2 量子奥托热机循环		18
1.4 量子热机的微观模型 II ——非平衡态情形		22
1.4.1 基于理想腔量子电动力学系统的量子热机(光子热机)		22
1.4.2 原子退相位及光场耗散对量子热机的影响		28
1.5 麦克斯韦妖、量子热机及热力学第二定律		30
1.5.1 麦克斯韦妖佯谬		30
1.5.2 有麦克斯韦妖参与的量子热机循环		31
1.6 从量子纠缠看量子统计热力学和量子相变		38
1.6.1 热化过程、量子纠缠与“广义正则原理”		38
1.6.2 自旋系统的量子相变与量子纠缠		45
1.6.3 横场伊辛模型的量子相变与洛克斯密特回波的动力学敏感性		48
1.7 小结		53
附录 横场伊辛模型的洛克斯密特回波		54

参考文献	56
2 基于自旋 Heisenberg 相互作用的量子信息处理	张国锋 李树深 61
摘要	61
2.1 量子信息概述	62
2.1.1 量子信息学的起源	62
2.1.2 量子信息的特点	63
2.1.3 量子信息学的研究内容	63
2.2 实现量子信息处理的物理方案	66
2.3 基于自旋 Heisenberg 相互作用的量子信息处理	67
2.3.1 利用自旋间的 Heisenberg 相互作用实现量子热纠缠	67
2.3.2 自旋 Heisenberg 相互作用实现量子逻辑门	71
2.3.3 自旋 Heisenberg 相互作用实现隐形传态和密集编码	73
2.3.4 结论	77
2.4 纠缠的量子热机	77
2.4.1 量子阶层热量与功的概念	77
2.4.2 基于模型(2.8)量子热机的工作原理	78
2.4.3 自旋-轨道耦合和体系纠缠对热学量的影响	78
2.4.4 结论	80
2.5 小结	81
参考文献	81
3 混态几何相位	衣学喜 王林成 仝殿民 84
摘要	84
3.1 引言	84
3.2 纯态几何相位	86
3.2.1 Berry 相位	86
3.2.2 Aharonov-Anandan 相位	87
3.2.3 纯态几何相位研究的扩展	88
3.3 混态几何相位	89
3.3.1 混态几何相位的几种定义	89
3.3.2 混态几何相位的实验显现	97
3.4 两体系统的几何相位	100
3.4.1 纠缠两体系统的几何相位	100
3.4.2 耦合两体系统的几何相位	105

3.4.3	量子化场驱动下两体系统的几何相位	110
3.5	开放系统的几何相位	116
3.5.1	退相位系统的几何相位	116
3.5.2	耗散系统的几何相位	120
3.5.3	环境的量子相变与系统的几何相位	122
3.6	非对角几何相位	127
3.6.1	纯态非对角几何相位	127
3.6.2	混态非对角几何相位	131
3.7	非线性量子系统的 Berry 相位	133
3.8	结束语	139
	参考文献	139
4	单光子态的产生、测量及应用 张天才 李 刚 张玉驰 李 园 王军民	143
	摘要	143
4.1	引言	143
4.2	单光子态的定义和性质	145
4.3	单光子态的重要意义和应用	149
4.3.1	单光子态在基本量子物理中的应用	150
4.3.2	单光子态在量子信息科学中的应用	151
4.3.3	单光子源在量子光学中的特殊意义	154
4.4	单光子态的测量	154
4.4.1	振幅测量	154
4.4.2	光子计数测量	157
4.5	单光子态的产生途径	161
4.5.1	单原子/单离子	163
4.5.2	单分子	166
4.5.3	单色心	168
4.5.4	单量子点	170
4.5.5	预告式单光子源	171
4.5.6	腔量子电动力学	173
4.6	总结与展望	177
	参考文献	178
5	双光子干涉的量子本性 汪凯戈	184
5.1	引言	184

5.2	双光子干涉的基本知识	185
5.3	双光子干涉研究的实验进展	186
5.4	理论预备知识	190
5.5	相同偏振双光子分束器干涉	192
5.6	任意偏振双光子分束器干涉	197
5.7	空间模式双光子分束器干涉	199
5.8	结束语	200
	参考文献	200
6	广义量子干涉原理及对偶量子计算机	龙桂鲁 刘 洋 202
	摘要	202
6.1	引言	203
6.2	计算机	205
6.3	广义量子干涉原理	208
6.4	量子分波与量子合波运算, 一个比特的对偶计算机	212
6.5	对偶计算机和对偶并行性	215
6.6	对偶计算机的实现方案: 对偶计算模式	217
6.7	对偶计算机的数学理论结构	219
6.8	量子计算机的一般形式的对偶模式和广义对偶门	222
6.9	在量子计算机上实现的对偶模式定点搜索算法	225
6.10	小结	227
	参考文献	228
7	量子纠缠判据、纠缠度量及隐形传态保真度的计算	李 明 费少明 王志玺 230
	摘要	230
7.1	引言	230
7.2	量子态的可分性判据与标准形	231
7.2.1	协方差判据和局域测不准关系判据	231
7.2.2	关联矩阵判据	236
7.2.3	量子态的标准形与可分性	238
7.2.4	量子态的 Bloch 表示与三体量子态的可分性	241
7.3	concurrence 的上下界	245
7.4	fully entangled fraction 与纠缠提纯	246
7.4.1	fully entangled fraction 的上界	247
7.4.2	纠缠提纯方案	248

7.4.3 FEF 与 concurrence	249
7.5 小结	251
参考文献	252
8 纠缠纯化与浓缩	盛宇波 邓富国 李熙涵 李 涛 254
摘要	254
8.1 引言	255
8.2 理想条件下的纠缠纯化模型	256
8.2.1 基于控制非门的纠缠纯化方案	256
8.2.2 改进的基于 CNOT 门的纠缠纯化方案	259
8.2.3 基于 Toffoli 门的纠缠纯化方案	261
8.2.4 基于 CNOT 门的多粒子纠缠纯化方案	262
8.2.5 单光子未知态提纯方案	266
8.3 基于线性光学元件的光量子系统纠缠纯化模型	267
8.3.1 基于线性光学元件 PBS 的纠缠纯化方案	268
8.3.2 基于实用参量下转换源的纠缠纯化方案	270
8.3.3 单光子纠缠纯化方案	273
8.4 基于非线性光学的可循环调用的纠缠纯化模型	276
8.4.1 基于非线性 cross-Kerr 介质的 QND 原理	277
8.4.2 基于 QND 的 PDC 纠缠源纯化原理	278
8.4.3 基于 QND 的理想纠缠源纯化原理	281
8.4.4 基于精确时间控制和 QND 的 PDC 纠缠源纯化原理	284
8.4.5 基于 QND 的多粒子纠缠纯化方案	286
8.4.6 利用 PBS 实现多粒子纠缠纯化	292
8.4.7 讨论与小结	292
8.5 确定纠缠纯化模型	293
8.5.1 基于超纠缠态的两步确定纠缠纯化模型	293
8.5.2 一步确定的纠缠纯化模型	298
8.6 纠缠浓缩方案简介	303
8.6.1 基于 Schmidt 投影的纠缠浓缩方案	303
8.6.2 基于纠缠 swapping 的纠缠浓缩方案	304
8.6.3 基于么正演化的纠缠浓缩方案	304
8.6.4 基于 PBS 的未知量子态纠缠浓缩方案	306
8.6.5 分级纠缠浓缩模型	308
8.6.6 单光子纠缠浓缩方案	313

8.7	电子系统的纯化与浓缩	316
8.7.1	基于电荷探测的电子系统纠缠纯化方案	317
8.7.2	单电子未知态的纯化方案	319
8.7.3	电子的高效纠缠浓缩方案	322
8.8	小结与展望	324
	参考文献	325
9	量子克隆	高 亭 闫凤利 328
	摘要	328
9.1	引言	328
9.2	分立量子系统的确定性克隆	332
9.2.1	Bužek-Hillery 量子克隆机	332
9.2.2	$N \rightarrow M$ 对称的通用量子克隆机	333
9.2.3	非对称 $1 \rightarrow 1+1$ 通用量子克隆机	335
9.2.4	依赖输入态的克隆	336
9.2.5	量子克隆与态估计	338
9.3	概率量子克隆及其应用	340
9.4	小结	344
	参考文献	344
10	联合噪声下的量子通信	李熙涵 邓富国 盛宇波 牛慧冲 346
	摘要	346
10.1	引言	346
10.2	基于宇称检测的量子避错通信	349
10.2.1	基于量子离物传态的光子避错传输方案	349
10.2.2	基于宇称测量的量子态避错传输模型	351
10.2.3	基于宇称检测的避错量子通信模型	353
10.2.4	讨论	356
10.3	引入时间自由度的量子避错传输模型	356
10.3.1	利用光子时间自由度对抗退相位噪声的量子密钥分配方案	356
10.3.2	利用光子时间自由度对抗转动噪声的量子密钥分配方案	359
10.3.3	基于辅助光子的抗噪声量子态传输方案	360
10.3.4	基于辅助光子和频率自由度的抗噪声量子态传输方案	363
10.3.5	两光子编码的避错量子密钥分配方案	364
10.3.6	讨论	366

10.4	任意单光子态的自避错传输·····	366
10.4.1	主动调制的单光子态自避错传输模型·····	366
10.4.2	被动等待式的单光子态自避错传输模型·····	370
10.4.3	改进的被动等待式的单光子态自避错传输模型·····	372
10.5	基于退相干无关子空间的容错量子通信·····	376
10.5.1	基于自旋单态的量子密钥分配模型·····	376
10.5.2	基于退相干无关子空间的量子密钥分配模型·····	378
10.5.3	基于退相干无关子空间的容错量子密集编码模型·····	384
10.6	引入模式自由度的量子通信·····	386
10.7	联合噪声下的纠缠分发方案·····	388
10.7.1	利用空间纠缠实现极化纠缠分发方案·····	389
10.7.2	利用频率纠缠实现极化纠缠分发方案·····	393
10.7.3	利用频率纠缠实现极化纠缠分发方案在量子通信中的应用·····	396
10.8	小结·····	398
	参考文献·····	398

量子信息启发的量子统计和热力学若干问题研究

孙昌璞 全海涛 董 辉

中国科学院理论物理研究所, 北京 100190

摘要

1.1 引言

1.2 量子热力学的基本观念

1.3 量子热机的微观模型 I ——平衡态情形

1.4 量子热机的微观模型 II ——非平衡态情形

1.5 麦克斯韦妖、量子热机及热力学第二定律

1.6 从量子纠缠看量子统计热力学和量子相变

1.7 小结

附录 横场伊辛模型的洛克斯密特回波

参考文献

摘要

近年来,受量子信息科学发展的启发,量子统计力学/热力学相关的基本物理问题重新引起了人们的关注,导致了一些新的热点研究方向。本文将首先介绍有关量子热力学的基本概念,如热力学第一定律和一些基本热力学过程的量子力学表述以及一些相关的最新进展,如 Jarzynski 等式。在此基础上,准确阐述量子卡诺(Carnot)热机和量子奥托(Otto)热机中的热力学循环过程,并且比较它们和经典热机循环的异同。接下来,基于一个比较真实的物理模型详细讨论了量子相干性以及环境诱导的退相干对量子热机工作效率的影响。最后,我们还利用量子受控逻辑门,给出了一个包含麦克斯韦(Maxwell)妖的量子热力学循环过程的实现方案,并探讨了在实验上演示麦克斯韦妖工作过程和信息擦除过程的可能性。

量子信息启发的另一个热点方向是量子统计力学基础方面的问题,如广义正则热化原理和自旋系统的量子相变问题。过去,人们关注的大多是量子相变与时间无关的性质,比如基态的量子纠缠在量子临界点的奇异性,而我们则对自旋体系中量子相变发生时的动力学敏感性进行了系统的研究。我们发现,在横场伊辛(Ising)模型中体系的洛克斯密特

(Loschmidt)回波会在量子相变临界点取极小值,这个结论揭示了量子相变对称性自发破缺和量子混沌以及量子退相干等领域的一些重要概念之间的深刻联系。

1.1 引言

1.1.1 量子热力学

热力学是描述热现象的宏观唯象理论。它主要包括热力学三大定律,具有高度的可靠性和普适性。热力学创建至今已经一百多年了,其应用领域不断扩大,已经成为物理学中的一个重要基石。爱因斯坦曾评论^[1]:“对于一个理论,其前提越简单,所涉及不同的东西越多,应用范围越大,它就越深刻。因此,经典热力学给了我深刻的印象。我深信,在其基础概念的应用框架里,它是唯一永远不会被推翻的、关于宇宙内容的物理理论。”

热力学对应的微观理论是统计物理学。它从宏观系统由大量微观粒子组成这一事实出发,认为宏观性质是大量微观粒子运动的集体表现,宏观物理量是微观量的统计平均值。统计物理学能够把热力学中三个互相独立的基本规律归结于一个基本的统计物理原理,阐明这三个定律的统计意义,还可以解释涨落现象^[2,3]。从统计物理学的诞生开始,物理学家们,如 Boltzmann、Gibbs、Birkhoff、Ehrenfest、von Neumann^[4]就在尝试着把唯象的热力学熵和统计熵(经典力学相空间的一定区域的体积)联系起来,把热力学理论完全简化为多粒子系统的牛顿力学。然而,他们都没能够绕开一些超出牛顿力学的额外的假设,如“各态历经”假说或者是“等概率”假说。另外,对于如何从更基本的物理理论推导热力学的有关基本原理,如热力学第二定律,直至今今天仍然是一个充满争议的问题。过去几乎所有推导这些基本原理的方法都是基于牛顿力学,而现在人们意识到,热力学系统本质上服从的是比牛顿力学更基本的量子力学。

目前,人们开始探讨把热力学建立在量子力学基础上的可能性,把热力学作为量子力学的一个层展(emergence)现象^[5],形成所谓的量子热力学。在这个新兴领域,人们关注的是如何从第一原理——量子力学,去描述理解热力学现象^[4]。最近一个重要思想是用量子纠缠来取代原来热力学中的各态历经假说(等概率假说)。量子统计力学的系综分布可以自然而然地从量子纠缠中得到,而不需要额外假设微正则系综分布或等概率^[6,7]。这些工作的成功,会重新改写统计物理学教科书中有关内容,直接把统计力学完全建立在量子力学基础之上。热力学基础和量子力学的一些基本性问题是彼此关联的,如光子作为工作物质的光子热与量子相干、量子纠缠与熵和黑洞信息丢失之谜、麦克斯韦妖、Landauer 原理与计算的物理极限的问题。这些研究彼此为对方提供了一个新的视角,将会彼此互相促进,并导致这些学科新的发展和新的发现。

平衡态量子热力学的研究内容还包括小尺度系统(有限粒子数)上的热力学^[8],甚至是纳米尺度范围上的热力学问题^[9]。因为通常热力学处理的是热力学极限(粒子数无穷大)下

的问题。但是随着纳米技术的发展,人们可以在纳米尺度的范围内研究物理系统的热力学性质。由于系统尺度偏离热力学极限的要求,会得到一些超越以前的热力学的结论。比如文献[8]中就发现当环境不是足够大时,系统被热化到一个“准平衡态”。也就是系统的约化密度矩阵的对角元服从 Gibbs 分布,但是非对角元的稳态并不趋于零。温度概念在宏观物质世界和原子尺度之间的某一区域失去意义,人们还可以精确地确定这个变化的“临界点”^[9]。小尺度上的热力学还涉及纳米机械振子的冷却^[10~12],使得观察到机械振子振动达到标准量子极限成为可能。

量子热力学的另外一个方向是 Jarzynski 等式^[13]。这个等式在非平衡热力学过程的做功量和平衡过程的自由能的改变量之间建立了等价关系。它在生物学中有广泛的应用。在实验上无法直接测量一个生物系统的自由能是否改变,只能通过测量准静态过程的做功量来间接得到自由能的改变。因为准静态过程原则上需要无穷长时间,因而很难做到。但是 Jarzynski 等式告诉我们,可以通过测量有限时间(非平衡或者说非准静态)过程的做功,并通过求平均的办法来间接求出自由能。这就为我们从实验上测量两个状态间的自由能的改变提供了一种可能。

1.1.2 从热力学角度看计算的物理极限

怎样从微观角度理解热力学第二定律,经常是莫衷一是、众说纷纭,甚至会导致一些违反常识性真理的永动机设想的产生。其中一个著名的例子来自所谓的“麦克斯韦妖”的挑战。1871年,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)在他出版的《热理论》(*Theory of Heat*)一书中讨论了热力学第二定律的局限性。他设想有一个充满气体、温度均匀的容器,容器中间有一个隔板,把容器分成 A 和 B 两个区域,隔板上有一个洞。另外,有一个今天被称为麦克斯韦妖(Maxwell's demon)的想象中的精灵,它能够区分每个分子的速度,并能够自由地打开和关闭这个洞。所以,它可以让较慢的分子从 A 到 B,而让较快的分子从 B 到 A,并且不消耗任何能量。经过足够长的时间以后,容器中的 A 区温度变高,而 B 区温度变低。从而,处于 A 和 B 之间的热机可以对外做功。把麦克斯韦妖和热机集成为一个整体,表面上形成了一个违反第二定律的永动机——第二类永动机,因为它可以从单一热源吸热并且把吸收的热全部转化为对外做功。整个循环过程的效果就是使系统加热库的整体熵减小,因此这个假想实验是违反热力学第二定律的。

麦克斯韦引入这个带有妖怪的假想实验的本意是要说明热力学第二定律是一个统计性的定律,统计涨落有可能违反它^[14,15]。但是后来人们对这个假想实验的关注逐渐演变为:如果存在这样一个麦克斯韦妖,它是否可以随意地(而不是由于涨落引起的概率性地)违反热力学第二定律呢?为了挽救热力学第二定律,Leo Szilard 在 1929 年提出了一个单分子热机模型^[16]。他第一次把“信息”作为一个重要的因素引入到麦克斯韦妖假想实验中来。在他的文章中一个重要的观点是“麦克斯韦妖”在获取信息的过程中(也就是测量的过程中)要消耗能量,从而导致整体熵增。这些熵增补偿了上面假想实验中熵的

减小。这样就不会出现违背热力学第二定律的第二类永动机了。但是后来的发展表明,这只是一个暂时性的结论,麦克斯韦妖佯谬的真正解决还依赖于关于信息的物理学基础的进一步发展。

1961年,Rolf Landauer^[17]研究了计算过程的热力学基础,提出了著名的 Landauer 原理:逻辑可逆的计算过程(包括读、写以及复制)的能量耗散可以是任意小的,或者是没有耗散。但是,计算机存储单元的信息擦除却是一个逻辑不可逆的过程。这个逻辑不可逆的过程伴随着一个最小的熵增。Landauer 指出每擦除 1 比特的信息,至少会有 $k_B \ln 2$ 的熵被释放到环境中。1982年,Charles Bennett^[18]认识到, Landauer 原理可以用来解决麦克斯韦妖佯谬的问题。麦克斯韦妖获取信息,并把信息存储在它的记忆单元中。一个完整的热力学循环必须包括麦克斯韦妖作为做功介质的一部分,要求其记忆单元也被还原到初始状态。由于擦除麦克斯韦妖的记忆单元带来的环境的熵增,可以抵消上面的假想实验中熵的减小,因此,麦克斯韦妖的存在,不会违反热力学第二定律。至此,麦克斯韦妖佯谬问题得到彻底解决^[19]。

除了在微观的层面给出麦克斯韦妖佯谬的一个解决方案, Landauer 原理的另外一个意义就是预言了计算的物理极限的存在。 Landauer 原理的直接结果是导致了所谓的摩尔定律的终结。因为计算机在完成一个有效计算的实际过程中,理论上一个循环必须包含初始化过程。物理上意味着它要对上一步骤中存储的信息进行擦除,从而必须消耗一定能量并以热量的形式散发掉。计算的速度越快,产生的热量就越多。当计算机芯片单位面积上集成的元件数目越多,发热的功率就越大^[19]。这种不可逆计算的耗热机制大大限制了计算机芯片的尺度,给出了其物理极限,从而导致摩尔经验定律(计算机 CPU(中心处理器)的运行速度每 18 月就会增加一倍)的终结。其实,在计算机发展的过程中,有各种各样“不那么基本”的物理条件制约计算技术本身。例如,逻辑元件是工作在稳态区域,而达到稳态需要一定的弛豫时间, Landauer 和 Bennett 的工作则主要强调了计算原理上的物理限制。对于以上物理原理带来的传统计算机发展的限制,一个可能的解决这个问题的方案就是当今蓬勃发展的量子信息科学。量子信息的研究,特别是量子计算的研究可能会为突破上述 Landauer 原理带来的限制提供新的启示和革命性的解决方案,并可能导致未来计算机架构体系根本性的变革。

1.1.3 量子计算集成中的多体问题与量子相变

为了实现有实际用途的量子计算机,需要把普适的量子逻辑门相干地集成起来,并加以操控。随着集成量子比特数目的增多,量子系统与环境的耦合导致的量子退相干(quantum decoherence)会变得越来越严重^[20]。因此,量子信息和计算的发展使得量子退相干重新成为一个研究热点。为克服量子退相干,量子计算的实验通常都是在极低温下进行。但是,改变系统参数进行量子操纵,即使在热力学温标 0 K 时,也会导致量子相变^[21]。最近,实验上实现的一个量子相变是:通过光晶格的深度,实现其中超冷原子的

超流-绝缘体相变^[22]。

量子相变和量子信息研究的交叉衍生出来的一个重要研究方向是把量子纠缠作为刻画量子相变的新工具。我们知道,经典相变通常都是在 Landau-Ginzburg-Wilson 理论框架下描述的。其中主要牵涉到的概念是对称性破缺、局域序参量和关联长度。统计力学和凝聚态物理学的发展都从这个理论受益良多。然而,与经典相变不同的是有些量子相变(如拓扑量子相变)有可能不伴随着对称性破缺,从而找不到合适的局域序参量来描述。事实上,对于多组分的、有相互作用的复杂系统(如微腔阵列中光场-原子耦合系统),很强的 Rabi 耦合破坏了通常的序参量假定。因此,很难找到一个合适的序参量,寻找新的刻画量子相变的理论工具成为理论物理学中一个重要的挑战。近年来,人们开始考虑借用量子信息科学的一些观念和方法(如量子纠缠)来研究量子相变。

最近,我们提出了用量子信息有关的两个概念——“退相干”^[23,24]和“量子保真度”^[24~27]来研究量子相变。大家知道,在量子相变点的两边,两个不同的相具有截然不同的性质。系统性质的这种急剧变化可以由洛克斯密特回波(Loschmidt echo)或两个态的重叠积分定量描述。不同的相,对与它耦合的量子系统施加完全不同的影响,我们有理由预期环境的相变会对耦合系统的相干性有很强的破坏^[28]。我们让这两个态对应于控制参数稍有不同的系统的基态。在远离临界点时,系统对微扰不敏感,保真度几乎为 1。但是在临界点附近,微扰可能使系统进入另外一个相区。从而它的基态结构发生了巨大的变化,导致保真度在临界点附近急剧下降。通过这些保真度的行为我们很容易得到该量子相变系统的相图。而且这种办法可能可以推广到经典相变系统,比如 BCS 相变和 BEC 相变。我们对两个温度稍有不同的系统的热平衡态作内积。我们不需要事先知道任何序参量或对称性破缺的信息。这种保真度方法刻画相变的一个重要应用是拓扑量子相变^[29],这里没有对称性破缺,也没有局域序参量的存在,保真度方法的威力就可以显现出来了。

1.2 量子热力学的基本观念

众所周知,平衡态热力学是建立在经典力学(牛顿力学)基础之上的唯象理论。但是现在我们知道,其实任何物质都遵守更基本的量子力学。如何把热力学理论建立在量子力学的基础上是一个非常值得研究的问题。比如说,如何把“做功”和“热传递”推广到量子力学的框架中,如何在量子力学框架内表述热力学第一定律,另外还有一些与此关联的问题,比如如何描述有限时间内的热力学过程(也就是非准静态或者说非平衡态过程),以及如何刻画小尺度(非热力学极限)系统的热力学性质。这些都是长期以来一直被人们忽视,但又十分重要的问题。由此专门发展出来的一门学科分支叫做量子热力学^[4]。下面我们就将经典热力学的一些概念作量子力学的推广,并介绍一些与量子热力学有关的基本概念和最新进展。首先介绍量子力学框架下的“功”和“热”。

1.2.1 热力学第一定律的量子力学描述

考虑任意一个多能级量子系统(见图 1.1)。为了简单起见,我们考虑的系统只包含离散能谱结构,并且只含有有限个本征能级。当然,也可以更一般地考虑具有无穷多个能级的系统。

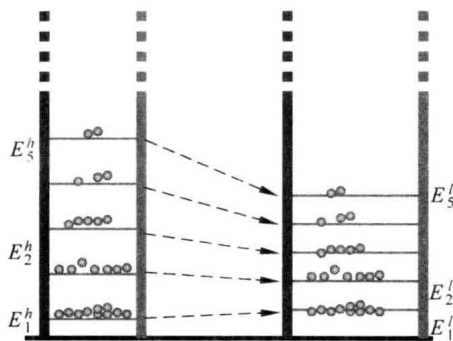


图 1.1 作为量子热机工作物质的多能级量子系统的示意图。 E_n^h 和 E_n^l 是工作物质在两个等容过程中的本征能量(等容过程将会在本章后面介绍,量子热机的循环将会在第 2 章介绍)。

该系统的哈密尔顿量可以写成

$$H = \sum_n E_n |n\rangle\langle n| \quad (1.1)$$

这里 $|n\rangle$ 是系统的第 n 个本征态, E_n 是它的第 n 个本征能量。不失一般性,选取基态 $|0\rangle$ 的本征能量为能量零点。这样,系统的哈密尔顿量式(1.1)可以被重新表述成

$$H = \sum_n (E_n - E_0) |n\rangle\langle n| \quad (1.2)$$

后面将会看到,用哈密尔顿量(式(1.2))来讨论系统的热力学性质会比用式(1.1)更加方便。对于这个系统,如果已知它在各个能级上的布居数 P_n ,那么它的内能 U 可以表示为

$$U = \langle H \rangle = \sum_n P_n E_n \quad (1.3)$$

为了将一些基本的热力学过程进行量子力学的推广,也就是定义量子力学系统的等温过程和量子力学系统的等容过程,需要先找到热交换 dQ 和做功 dW 的量子力学对应的表述。从式(1.3)可以得到

$$dU = \sum_n (E_n dP_n + P_n dE_n) \quad (1.4)$$

在经典热力学中,热力学第一定律被表述为

$$dU = dQ + dW \quad (1.5)$$

其中, $dQ = TdS$, $dW = \sum_i Y_i dy_i^{[30]}$, T 和 S 分别是温度和熵, y_i 是广义坐标, Y_i 是与 y_i 共