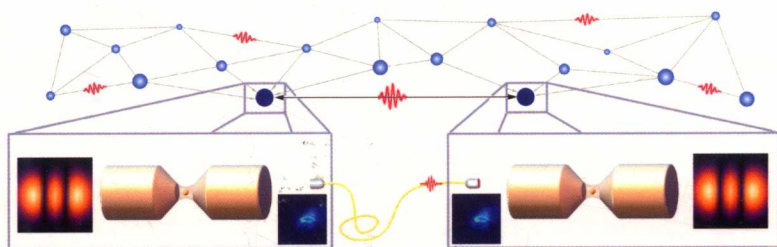


强耦合双光学微腔系统中 单粒子的操控与测量

■ 郭龔强 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

强耦合双光学微腔系统中 单粒子的操控与测量

郭龔强 著



国防工业出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书主要围绕强耦合双光学微腔的构建及单原子的俘获与测量展开,利用搭建完成的高精细度双光学微腔系统,介绍对单个原子的俘获和测量得到的结果,不同光场非经典统计特性的理论和实验的内容,最后介绍了基于双 Cavity QED 系统飞行比特之间的纠缠转移、信息传递和内态操控等内容。

本书内容涉及量子光学和原子物理等方面知识,适宜相关领域的研究生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

强耦合双光学微腔系统中单粒子的操控与测量/郭
龔强著. —北京:国防工业出版社, 2018.4

ISBN 978-7-118-11647-2

I. ①强… II. ①郭… III. ①粒子—测量—研究
IV. ①O572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 115308 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5 1/4 字数 152 千字

2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—600 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

本书是作者在从事基础物理研究的基础上，结合博士研究生学习期间参与完成的国家自然科学基金项目、优秀创新团体、国家重大科学研究计划项目等科研工作，总结提炼而成的一本专著。同时结合当前国内外量子物理科学领域取得的最新进展，力求准确把握最新科研动态，以科学严谨的态度编撰而成。

本书主要介绍了单个粒子与微腔内特定受限空间内场之间相互作用这一最基本的物理过程，强耦合的光学微腔提供了一个相干性良好并且纯净的环境，可有效地在单粒子水平上深刻揭示物质与场相互作用的基本行为。实验与理论预言惊人地一致，可精确到小数点后数十位。Feynmann 将其称为物理学的一颗明珠，它起源于 20 世纪 60 年代，相关领域的研究成果已摘得数次诺贝尔物理学奖的桂冠，已成为量子物理科学的前沿领域并逐渐深入到人们的日常生活中。腔量子电动力学 (Quantum Electrodynamics, QED) 是一门理论与实验精密联系的学科，大学本科生能够在学完电磁学和基本量子力学以后很容易领会它。使其作为一个观察物理学基本问题的代表性窗口，学生能真实地感受到光场与物质相互作用最基本层面发生的量子现象。在量子网络的构建中，需要信息传递的通道和节点，强耦合的腔 QED 系统为单个原子和光子之间的相互作用提供了一个理想的平台，在未来的量子信息中占有一席之地。本书内容主要围绕强耦合双光学微腔系统中单粒子的操控与测量展开，希望利用量子物理中信息传递的特殊性质，实现单原子节点之间的量子通信和量子逻辑门的构建。

全书分为 7 章，第 1 章主要介绍腔 QED 的研究应用及其发展现状；第 2 章介绍了腔 QED 的基本原理和实验测量方法；第 3 章介绍了搭建的高精细度双光学微腔系统，频率链系统及单原子俘获与探测

系统及其具体参数；第4章介绍量子态测量方面的工作，主要基于光子的计数测量，完成了对单光子态非经典性的测量，同时提出了一种新的非经典判据，并给出了相关的理论和实验方面的研究结果；第5章介绍基于双CQED系统的飞行比特之间的纠缠转移，利用理论上对实验系统进行的数值模拟，给出了不同纠缠光场驱动下的结果，并分析得出了实验上具体条件中损耗的影响，为实验上实现纠缠转移及信息传递提供了方案；第6章介绍了在单原子内态操控方面的实验进展和方案；第7章是对全书的总结和未来工作的展望。

本书在编写过程中力求循序渐进，简明易懂，希望为相关领域的学生及同行提供参考和帮助。

本书在编写过程中参考了相关文献和著作，在此对这些文献和著作的作者表示衷心的感谢！特别对博士研究生学习期间的导师、工作单位及对本书工作给予支持和帮助的人们表示感谢！

由于科学进展日新月异，发展迅速，加之作者水平有限，书中难免存在错漏之处，欢迎读者不吝指正。

郭龔强

2018年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 腔 QED 研究的意义及其应用	2
1.3 腔 QED 研究进展与概况	7
1.3.1 强耦合腔 QED 系统	8
1.3.2 光频区腔 QED 的发展现状	8
1.3.3 新型腔量子电动力学系统的研究进展	11
1.4 单个原子的全控制	14
1.4.1 光学偶极阱俘获和操控单个原子	14
1.4.2 微型光学腔俘获和操控单个原子	15
1.4.3 单个原子内态的操控	16
1.5 研究进展与本书的结构安排	18
第 2 章 腔与原子相互作用的基本理论和实验测量方法	20
2.1 引言	20
2.2 J-C 模型	21
2.3 开放的量子系统	23
2.4 光频区腔 QED 系统的主要参数	27
2.5 腔 QED 学系统中的若干测量	29
2.5.1 单个原子位置信息	30
2.5.2 原子的温度测量	31
2.5.3 辐射的统计及其关联特性的测量	32
2.6 小结	36
第 3 章 实验装置	37
3.1 引言	37

3.2	真空系统	38
3.3	铯原子磁光阱冷却与俘获系统	40
3.4	高精度度双光学微腔	44
3.5	新搭建的频率链系统	48
3.5.1	激光系统的设计和搭建	49
3.5.2	传导腔的设计和搭建	50
3.5.3	频率链的锁定	52
3.6	单个原子的偶极俘获与荧光探测系统	55
3.6.1	远失谐偶极俘获系统	56
3.6.2	单个原子荧光探测和收集系统	57
3.6.3	数据采集及时序控制系统	60
3.7	小结	62
第 4 章	单粒子的操控和测量	63
4.1	引言	63
4.2	单光子计数方法	64
4.2.1	数据采集卡 (P7888) 及 SPCM	65
4.2.2	单光子计数的概率统计	67
4.2.3	不同光场的二阶相干度	68
4.2.4	传统的 HBT 实验	69
4.3	单个原子的俘获与测量	71
4.3.1	微尺度光学偶极阱及其描述	71
4.3.2	实验装置及参数	75
4.3.3	偶极阱中单个原子的俘获及其成像	79
4.3.4	单个原子的荧光信号探测	82
4.3.5	偶极阱中单个原子寿命的测量	82
4.3.6	单原子辐射荧光的统计性质	86
4.4	光场非经典性及其度量方法	88
4.5	基于 Double HBT 方案的非经典判据	90
4.5.1	新的非经典判据的提出	91
4.5.2	基于多 SPCM 的理论分析	93
4.5.3	不同入射光场时的结果	97

4.5.4	与可分辨光子数探测器方案的比较	104
4.5.5	实验研究	106
4.6	小结	110
第 5 章	基于双 CQED 系统的飞行比特之间的纠缠转移	111
5.1	引言	111
5.2	基于高精度度双光学微腔纠缠转移的理论模型及其 实验意义	113
5.3	驱动光场为 NOON 态时的结果	118
5.4	驱动光场为纠缠相干态时的结果	119
5.5	飞行比特间纠缠的度量	121
5.6	在现有实验可操控条件下原子以不同方式运动时 的结果	122
5.7	考虑损耗后两飞行比特间纠缠的动力学演化过程	127
5.7.1	在现有实验条件下所得出的结果	127
5.7.2	在损耗很大时所得到的结果	130
5.7.3	两飞行比特间纠缠以外其他的量子关联及其度量	133
5.8	小结	136
第 6 章	单个原子内态的操控	138
6.1	引言	138
6.2	单原子内态的选取和初始化	138
6.3	(Raman) 激光的获得	140
6.4	单原子内态的控制和测量	144
6.5	单原子的 Rabi Flopping	148
6.6	讨论和小结	149
第 7 章	总结与展望	150
参考文献		153

第1章 绪 论

1.1 引 言

2012 年, 诺贝尔物理学奖授予了法国的 Serge Haroche 教授和美国的 David J. Wineland 教授, 为表彰他们在光与原子相互作用方面所作出的突出贡献, 使测量和操控单个量子体系成为可能。其中 Serge Haroche 教授从事微波区的腔量子电动力学 (Quantum Electrodynamics, QED) 很多年 (以下称为腔 QED)。他的获奖激发起人们对这一领域的关注。实际上, 作为一个重要的量子物理的研究领域, 腔 QED 具有很长的发展历史, 它主要研究受限空间中物质与场相互作用的量子行为。人们形象地将腔 QED 系统比喻为一个充满光子的盒子, 在这个密闭的“盒子”内, 人们研究真空、光场和物质粒子之间的相互作用, 帮助人们在量子水平上认识场与物质相互作用的最基本过程, 探索物理世界的基本问题。腔 QED 真正起源可以追溯到 20 世纪 40 年代, Edward M. Purcell 提出的 Purcell 效应, 认为在特定环境中原子的自发辐射率会发生改变。这项研究根植于由 R. Feynman 等一批物理学家发展起来的量子电动力学, 该理论作为一个认识物质-场相互作用的基本理论在精密光谱中与实验密切接合, 是一个重要的工具。1947 年, Purcell 和他的合作者在实验上证明了 Purcell 效应, 同年 Willis E. Lamb 发现了 Lamb 移动 (Lamb Shift), 1948 年 Casimir 发现了真空引起的 Casimir 力效应。人们发现了量子世界的一系列新奇的效应, 直至 1960 年激光的问世。激光的出现极大地推进了光与物质相互作用的研究, 有了激光才有可能在光频区开展腔 QED 的研究。1963 年, E. T. Jaynes 和 F. W. Cummings 建立了 J-C 模型, 开启了单个原子与量子化场之间相互作用的研究。在这期间 Roy J. Glauber 建立了光场的量子

理论，为人们利用全量子的方法研究光与原子相互作用奠定了坚实的基础。随着量子理论的发展，各种新奇的物理现象被预言和发现，1985年，腔 QED 的研究进入强耦合区，随后人们观测到了一系列量子现象，如 Rabi 振荡、Rabi 分裂、原子辐射光场的各种非经典效应等。90 年代初期，腔 QED 已逐渐成为研究物质和场作用的重要领域，人们已经可以在单个粒子水平上研究其在受限空间中的量子行为，深刻认识光场与原子相互作用的基本过程。腔 QED 近些年得到了快速发展，很多新技术、新方法、新的结构材料不断涌现，出现了精细度更高、结构更加小型化腔 QED 系统，这期间量子光学、激光冷却与俘获原子技术以及其他新的操控技术应用到实验过程中，这些实验和技术不断推进腔 QED 的发展，同时腔 QED 也极大地推进了量子光学，原子分子物理及光物理相关领域的发展，并逐渐被应用到量子信息，量子计算及量子精密计量等方面，其取得的成果已受到越来越多的关注，在未来量子光学领域将会继续发挥重要的作用、成为不可取代的角色。本章将从腔 QED 研究进展，研究意义及现阶段的发展现状和取得的成果等几个方面，对腔 QED 进行一个介绍，并概况说明其研究进展和本书的主要工作。

1.2 腔 QED 研究的意义及其应用

从腔 QED 的发展历史中，可以看出人们对物质-场相互作用这一基本问题的关注。这种持续的来自腔 QED 系统在理论和实验方面解决这个根本问题的能力和由此发展出的许多技术的重要应用。本节主要从腔 QED 最近几年的发展中，列举它在量子光学及相关量子信息领域的应用。

1. 量子物理中基本问题的研究及量子测量

腔 QED 系统可以帮助人们获得对许多基本物理问题的理解，并在实验上进行演示。如图 1.1 中列出了部分代表性的基于腔 QED 系统演示的重要现象。

1) 非线性光谱的研究及其应用 (Nonlinear Spectroscopy)

1995 年, 人们通过腔 QED 系统演示了腔中原子作为非线性介质对光场的影响^[14]。通常情况下, 产生非线性光谱需要强光和宏观的非线性介质, 但是对于单光子和单原子之间的非线性相互作用, 不可能通过宏观物质间的非线性过程探测到, 利用腔 QED 系统, 可以在量子水平上观察单个粒子的非线性效应。

2) 单原子的 Rabi 振荡

Rabi 振荡是原子与光场相互作用的一个重要标志, 已经被应用到量子物理的基本测量中, 同时也是控制原子与光场相互作用过程的重要依据。单个原子光场的反聚束效应^[15]直接反应了光场的非经典性, 是证明光场非经典关联的重要手段。

3) 量子非破坏性测量 (Quantum Non-Demolition Measurement)

实现了对单粒子从产生到最后消失的无破坏性测量, 这让人们能够在单量子水平上完成对单个粒子的观察, 认识量子的退相干过程。与通常意义下的测量不同, 一般的测量过程中, 每次测量可以说都是一次“破坏”, 这种对单粒子的非破坏性测量是 1990 年法国的 S. Haroche 小组首先提出的。1999 年, 他们利用微波腔中的 Rydberg 原子和腔场的强耦合, 第一次在实验上通过腔 QED 系统, 实现了对单个光子的非破坏性测量^[16]。他们通过原子波函数位相的变化来确定单个光子的状态, 最终完成对单个光子的非破坏测量。

4) 腔内单个原子的电磁感应透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT)

如图 1.1 所示, 人们在高精细度的光学微腔中实现了单个原子的 EIT, 基于此可以研究单原子的量子存储和光场量子态的制备。EIT 现象因其在量子信息、量子存储及光场减速等方面的应用, 一直被人们广泛关注。在强耦合的腔 QED 系统中实现 EIT, 不仅可以从单量子水平上了解单个原子对信息的存储和对光子的操控能力, 也为下一步实现多原子的 EIT 和非经典光场的产生奠定了基础。

5) 单个原子的压缩光场

人们很早就发现单个原子辐射的荧光具有压缩的特性, 但是这种压缩在实验上是很难被观测到的。通常人们得到的压缩光是在宏观或

量子物理中基本问题的研究及量子测量

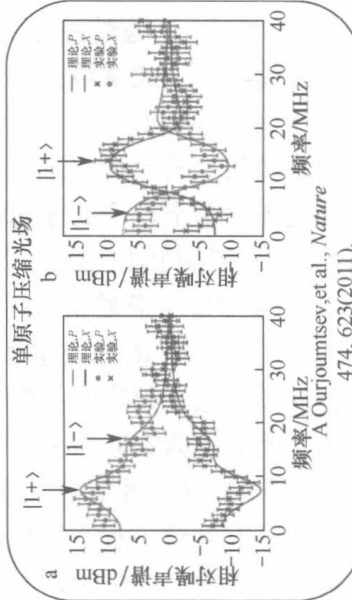
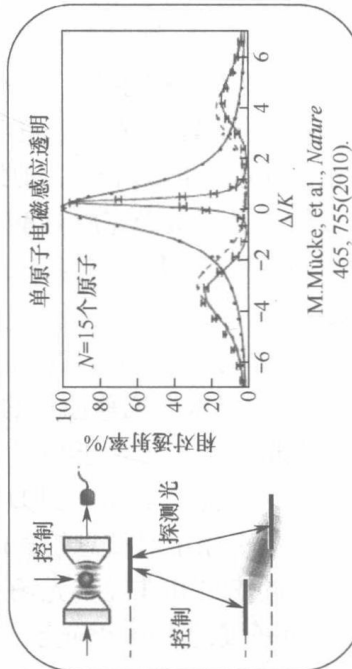
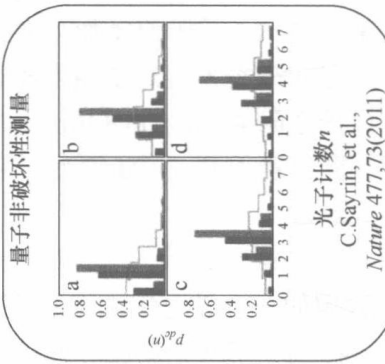
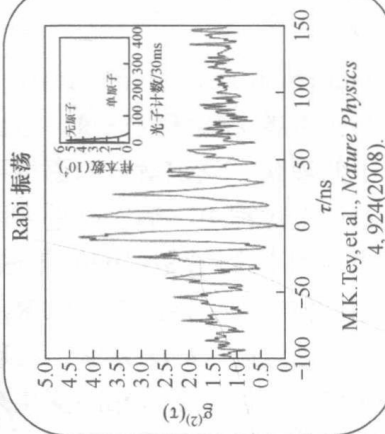
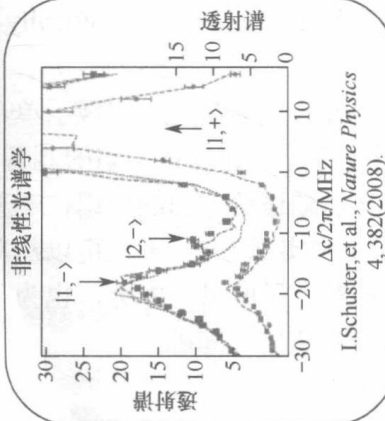


图 1.1 腔 QED 系统所能解决的基本物理问题

是介观尺度的，通过腔 QED 系统人们第一次看到了单个原子的压缩光，完成了对早期理论的验证，这使人们对基本粒子光场性质的认识更进了一步^[22]。

2. 腔 QED 在量子信息方面的应用

如图 1.2 中列举了若干腔 QED 在量子信息方面的基本应用。

1) 单光子源的产生和应用

人们一直希望利用单个原子获得确定性出色的单个光子，进而完成单原子的激光器，实现可控单光子源是未来实现量子计算的关键器件。21 世纪初人们已经利用腔 QED 系统，在实验上制备出了可控的单光子源，比较有代表性的是美国的 Kimble 小组和德国的 Rempe 小组。他们在光频区实现了可控的确定性的单光子源。于此同时，在微波区德国的 Walther 小组利用离子也同样制备出单光子源，并且产生的单光子脉冲可以是任意形状。最近 Haroche 小组还实现了多达 7 个光子的 Fock 态。

2) 量子纠缠及纠缠态的产生及应用

量子纠缠是量子信息中的重要资源，在量子通信中发挥着重要作用。强耦合的微波腔、光子以及腔内的原子实际上处于一种量子纠缠的状态。20 世纪末人们利用强耦合的微波腔完成了三体之间彼此的纠缠。在光频区，利用强耦合的腔 QED 系统，德国的 Rempe 小组也已实现了光子之间，原子之间，以及原子和原子之间的量子纠缠。这些实验工作成为进一步构建量子通信及量子网络的基础。

3) 基于腔 QED 的量子网络

量子信息的发展需要不同系统间进行信息的传递，同时在量子节点上对信息进行存储。光子被认为是信息传递的理想选择，而原子则被人们认为是量子存储的最小单元。强耦合腔 QED 系统，正好结合了以上两点，通过原子和光子之间的相互映射，构建量子网络。2012 年，人们已经利用腔 QED 系统模拟了量子网络。

3. 量子精密测量方面的应用

利用强耦合腔 QED 系统实现对单个原子轨道的精密测量，可以在微米甚至亚微米尺度上对单个原子的轨迹进行追踪，被人们称为单

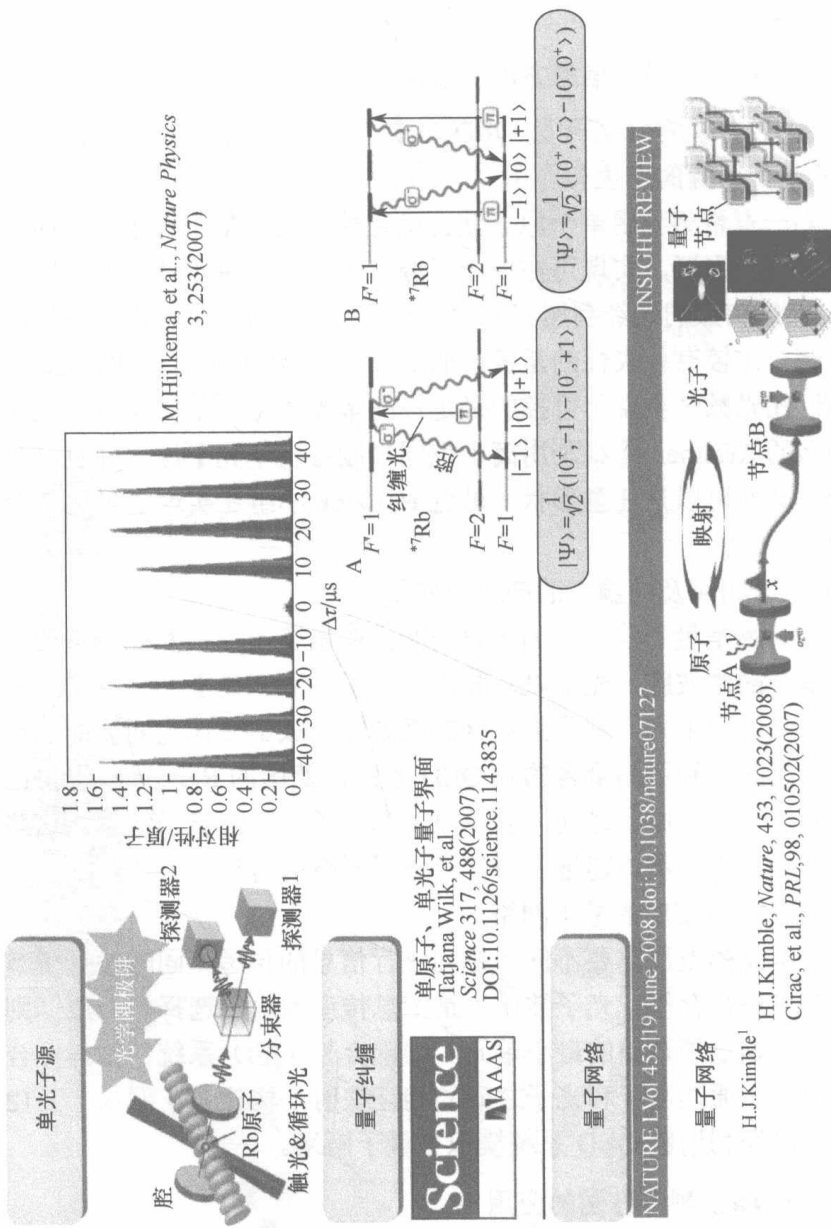


图 1.2 腔 QED 系统在量子信息方面的应用

原子的显微镜。2000 年,美国的 Kimble 小组利用强耦合的腔 QED 系统实现了对单个中性原子轨迹的测量。2011 年实验小组利用腔内高阶模,消除了原子轨道简并,将原子轨迹的测量精度提高了一个数量级。可见腔 QED 系统在精密测量及高灵敏探测方面是极具潜力的。

1.3 腔 QED 研究进展与概况

腔 QED 从 20 世纪 40 年代起,距今已有 70 年的历史。腔 QED 为人们深刻理解光与物质间的相互作用发挥着重要作用。在研究单粒子与场之间的相互作用的过程中,腔 QED 系统为人们提供了一个最基本的模型。在腔 QED 的发展历程中,从自发辐射的改变,到腔中物质与场之间的弱耦合,中等强度耦合,再到强耦合甚至超强耦合;从腔中大量原子到单个原子的俘获与操控,从微波区的低温超导腔到光频区常温下的谐振腔。在这个过程中,人们观察到了量子力学中一系列的物理现象,并发展了各种实验技术和方法,使人们可以在单粒子水平上操纵和控制量子系统。随着腔 QED 系统理论和实验的发展,基于电子芯片、超导材料、光纤腔、光子带隙结构、光子晶体、光力系统、光学薄膜等一些新型腔 QED 系统应运而生。但是原子作为构成这个世界天然的基本单元,它与场的相互作用仍然是揭示和研究量子物理基本问题的关键。不同的系统在不同的尺度和范围内演示着腔 QED 中腔与原子相互作用的过程。在不同的应用范围内,它们发挥着各自的作用,如光力系统可望应用到引力波探测和量子信息方面,与玻色爱因斯坦凝聚(BEC)的结合可以实现更强的耦合。20 世纪 90 年代由于冷原子技术的发展,腔量子电动力学取得了快速的发展。1992 年,光频区腔 QED 系统进入强耦合区之后,各种光频区的量子现象被相继观测到,如真空 Rabi 分裂、光子的亚泊松(Sub-Poisson)统计、反聚束效应等。至此强耦合的腔 QED 系统为观察单个粒子的量子行为提供了一个有力的平台。以下内容主要关注光频区的强耦合腔 QED 系统。

1.3.1 强耦合腔 QED 系统

强耦合腔 QED 系统在演示量子信息、量子测量以及研究光与原子相互作用等方面发挥着巨大的作用。1985 年,来自德国的 G. Muller 和 H. Walther 等人首次成功实现了微波腔的强耦合。1992 年,美国加州理工大学的 Kimble 小组实现了光频区的强耦合,并观察到了真空 Rabi 分裂。强耦合腔 QED 系统,为单个原子和腔场之间提供了强的相互作用,一个原子就足以改变整个腔场的性质,同时单个光子的进入腔内也会改变原子的状态,所以人们可以通过对单个光子和原子的探测,了解它们的变化和基本的物理性质。其次在强耦合腔 QED 系统中,单个原子和光场的作用增强,单个原子可以作为量子存储单元,单个光子作为信息的载体,实现在不同存储单元间量子信息的传递,构建量子网络,而且此时单个原子和腔场之间的强相互作用,保证了信息存储的高效和相干性,同时单个光子传输也保证了信息传输的高保真度。因此,腔 QED 系统被人们认为是构建量子网络的重要途径。人们还利用强耦合腔 QED 系统产生各种非经典光场并研究量子退相干和量子纠缠方面的性质。通过上述各方面的研究,各种基于强耦合腔 QED 系统的量子信息资源制备出来,一方面利用强耦合腔 QED 系统实现对物理量的精密测量及实现对单粒子非线性精密光谱的研究;另一方面强耦合腔 QED 系统制备的各种纠缠态,如薛定谔猫态、光子数态、NOON 态,等等,这些量子资源在量子计量等方面发挥着重要作用,它们可以填补真空噪声通道,突破了经典界限,达到更高的测量精度。在微波区强耦合腔 QED 系统中,存在着一些根本的困难,如无法对单个原子的位置进行确定性的控制,因为微波腔的体积很大,无法获得飞行原子的确切位置信息;其次为了让腔 QED 系统在一个“干净”的环境中工作,整个系统需要在低温下运转。光频区的腔 QED 系统正好弥补了这方面的不足,可以在常温下对单个原子进行确定性的操控。下面从光频区介绍强耦合腔 QED 系统的发展历程。

1.3.2 光频区腔 QED 的发展现状

光频区腔 QED 的发展源于 20 世纪 70 年代末,历经 30 多年的发

展，已经取得了显著的成就。从腔中临界光子数的变化可以看出这一发展过程，如图 1.3 所示，从图中可以看到 1992 年光频区腔 QED 系统进入强耦合，临界光子数小于 1（临界光子数的降低直接反应了耦合强度的增大），人们发现了原子和腔场的真空 Rabi 分裂。图中的圆点表示利用传统的球面镜搭建的 F-P 腔，方点表示新型的微球腔，空心的点表示光子晶体或者其他新型系统构建的微环芯腔，图 1.3 中的五星（★）表示山西大学腔 QED 实验小组目前的系统参数，表明已经进入了强耦合区域。在光频区腔 QED 系统中，激光冷却与俘获原子的技术，是不可或缺的支撑。因为在受限空间内，实现光与原子的相互作用，需要对原子进行减速，进而才能进行下一步对原子的确定性操控。但是高精度度光学微腔的建立，需要良好的镀膜技术和加工工艺，同时在腔内几十微米的空间内对原子进行控制，需要解决一个又一个的技术难题。在光频区腔 QED 的研究已经越来越多，代表性小组包括美国的 Kimble 小组和德国的 Rempe 小组，德国的 Walther 小组曾在单离子 QED 方面完成了出色的工作。这些代表性小组在光

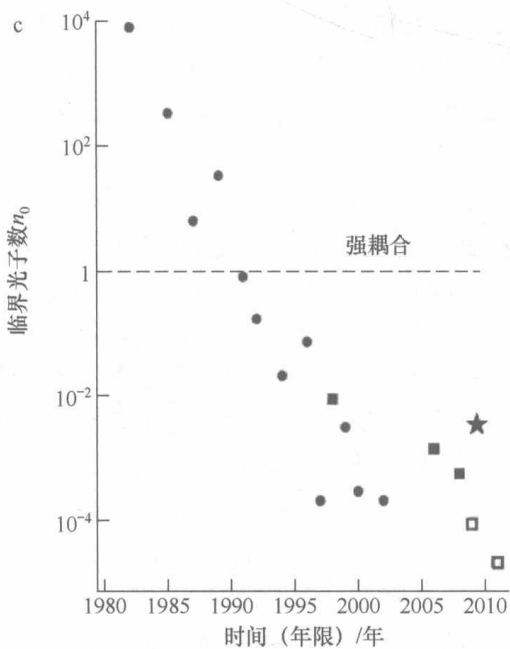


图 1.3 光频区腔 QED 系统临界光子数 30 多年的变化