

# 宏观人工原子相关的量子相干操纵\*

孙昌璞<sup>†</sup> 王颖丹 张 鹏

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

刘玉玺

( Frontier Research System , The Institute of Physical and Chemical Research ( RIKEN ) , Wako - shi 351 - 0198 , Japan )

**摘 要** 文章着重介绍作者及其合作者于 2005 年 8 月份发表在 Physical Review Letters 的 2 篇文章<sup>[ 1,2 ]</sup>及其相关的系列研究工作<sup>[ 3-5 ]</sup>. 其中包括 ( 1 )利用超导电荷量子比特的“ Bang - Bang ”控制,去冷却与之相耦合的纳米机械谐振器件,使之接近基态,以展示其丰富的量子效应 ( 2 )具有  $\Delta$  型能级结构超导人工原子的物理实现及其绝热量子操纵的奇异特性. 为了深入了解这些工作的物理和潜在的应用背景,文章同时也介绍了超导量子比特物理实现及其相关的“全固态系统腔量子电动力学”研究的新进展,强调了基于超导人工原子的强耦合量子光学结构形成的物理机制.

**关键词** 超导人工原子, 纳米谐振器件, 量子操纵, 微腔量子电动力学

## Quantum manipulations based on macroscopic artificial atoms

SUN Chang-Pu<sup>†</sup> WANG Ying-Dan ZHANG Peng

( Institute of Theoretical Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

LIU Yu-Xi

( Frontier Research System , The Institute of Physical and Chemical Research ( RIKEN ) , Wako-shi 351-0198 , Japan )

**Abstract** A review is presented of recent research by the authors and their collaborators , including two papers published in 2005 in Physical Review Letters. The two main topics are :( 1 ) The quantum“ Bang - Bang ” control of a superconducting charge qubit is utilized to cool its coupled nano-mechanical resonator so that the ground state can be reached , by means of which the GHz oscillating nano-mechanical resonator can display the enriching quantum effect ;( 2 )The physical realization of  $\Delta$  type artificial atoms as a superconducting circuit and the exotic features of its adiabatic manipulation. To understand fully the physics and potential application in modern technology of these two topics , we also review their background relevant to the cavity quantum electrodynamics structure based solid state artificial atoms formed by superconducting circuits and the GHz oscillating nano-systems with certain strong couplings.

**Keywords** superconducting artificial atom , nano-mechanical resonator , quantum manipulation , cavity quantum electrodynamics

### 1 引言

由于固态体系量子计算发展的迫切需求,近年来利用超导约瑟夫森结量子电路实现二能级人工原

\* 国家自然科学基金(批准号 90503003 ,10474104 )中国科学院知识创新工程、国家重点基础研究发展计划(批准号 2005CB724508 )资助项目

2005 - 10 - 13 收到初稿, 2005 - 11 - 22 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email : suncp@itp.ac.cn

真空 Rabi 劈裂( vacuum Rabi split )与交流 Stark 效应

真空 Rabi 劈裂是一种典型的微腔 QED 效应. 微腔电磁场能够与其中的原子发生较强的耦合. 在耦合极限时, 即使电磁场处在真空态上, 它在近共振时也会形成称为缀饰态的束缚态. 于是, 在共振时, 最低的两个激发态的能级差正比于原子和光场的耦合强度, 如图 1( a)所示. 当原子与光场的复合体从这两个激发态跃迁到基态时, 辐射或吸收谱发生双峰劈裂, 如图 1( b)所示.

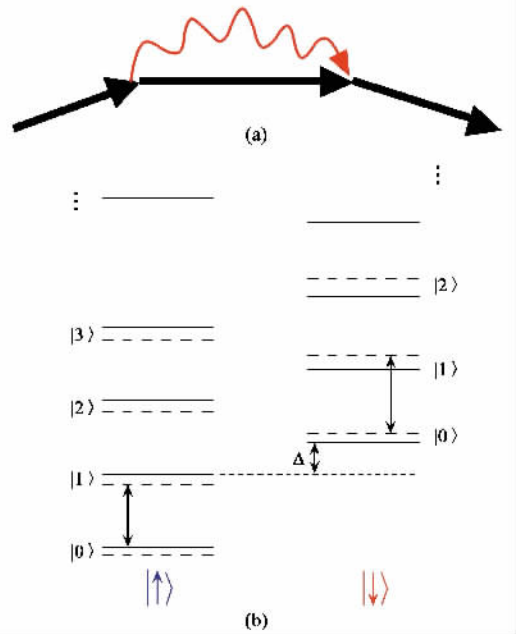
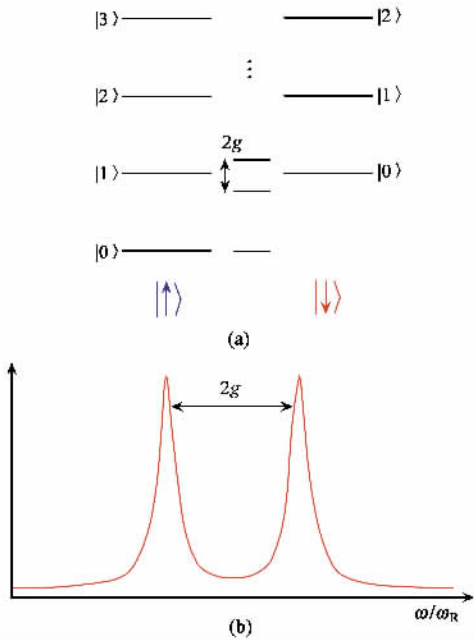


图 1 ( a) 缀饰态能级 ( b) 真空双峰 Rabi 劈裂 图 2 ( a) 交换虚光子的二级过程 ( b) 原子能级的 Lamb 移动

另一方面, 在强耦合极限下, 如果微腔中光场频率与原子能级差相差很大( 大失谐极限 ), 原子将不会吸收光子发生跃迁. 但是由于如图 2( a) 所示的交换虚光子的二级过程, 原子能级会发生所谓的 Lamb 移动[ 见图 2( b) ], 从而使得原子的有效能级差发生改变, 产生所谓的交流 Stark 效应. 其中“交流”二字, 体现为微腔中电磁场的时变性.

量子 - 超导量子比特的研究, 在实验和理论方面均取得了引人瞩目的进展<sup>[6-9]</sup>. 由于超导量子器件的宏观量子特性, 各类超导量子比特( 包括电荷量子比特、磁通量子比特和位相量子比特 ) 的实验, 本质上展示了宏观尺度上人工原子结构的存在.

为了进一步揭示这种宏观人工原子所展现的新奇量子现象, 并把它们应用于量子计算的物理实现研究, 人们探索了这种人工原子与微波电磁场、超导传输线( superconducting transmission line )<sup>[10]</sup>以及纳米机械谐振器件( nano-mechanical resonator )<sup>[11]</sup>实现强耦合的可能性. 一旦能够实现各种玻色子模式与超导体人工原子的强耦合, 人们便实现了一种崭新的、甚至是全固态的腔量子电动力学( Cavity QED ) 结构<sup>[12]</sup>. 从而不仅可以在更广泛的范围内探索真空

物理效应等场量子化现象, 而且可以在固态系统中实现以此类玻色子模式为数据总线( Data Bus ) 的量子信息传输. 令人振奋的是, 在过去两年里, 这方面研究取得了突飞猛进的发展<sup>[13,14]</sup>. 实验上已经成功地观测到超导传输线与电荷量子比特强耦合导致的真空 Rabi 劈裂和相应的交流 Stark 效应( 或 Lamb 移动 ).

一方面, 这些重要进展证实了量子光学和微腔 QED 结构的普适性: 人工原子与场的相互作用和自然原子具有相同的物理特性; 另一方面, 它会启发人们去探索在固体系统中人工原子所特有的新奇的量子光学现象, 并由此发展各种新型的量子操纵技术, 为量子计算机的最终实现奠定基础. 这些考虑, 正是我们开展超导体人工原子量子光学特性理论研究的

动机之一. 为了深入理解基于超导量子电路微腔 QED 研究的物理意义和在量子信息中的应用, 本文将介绍超导量子比特物理实现及其相关的“全固态系统腔量子电动力学”研究的系列进展, 深入讨论基于超导体人工原子的强耦合量子光学结构形成的物理机制.

## 2 从自然原子的腔 QED 到人工原子的电路 QED

为了全面准确理解上述进展的重要意义, 我们先从自然原子的微腔量子电动力学(微腔 QED)谈起. 微腔 QED 是研究原子与受限量子光场耦合的基本理论. 一个简单的模型——Jaynes - Cummings (JC) 模型<sup>[12]</sup>, 可以用来描述单个原子和单模量子化电磁场相互作用的量子电动力学过程. 微米量级腔体的体积甚小, 其中的场与原子间的耦合就被大大增强, 从而场和原子会强烈地关联到一起, 形成被称为缀饰态(dressed state)的束缚态. 能量最低的两个束缚态到基态的自发辐射, 会产生所谓的真空 Rabi 劈裂, 相比之下, 原来的二能级原子只有单峰的谱线. 真空 Rabi 劈裂是腔 QED 的第一个特征性效应. 腔 QED 的第二个典型效应是所谓的真空自发辐射的增强和抑制, 前者是由于腔壁的限制作用改变了共振时的电磁场的态密度, 而后者是由于微腔对电磁场模式有选择性. 可以想象, 一个波导存在截止频率, 当其中原子辐射的频率低于这个值时, 原子的辐射必然被抑制. 腔 QED 的另一个效应是原子能级的 Lamb 移动, 当光场的本征频率与原子的能级间距有很大差别时, 原则上原子不吸收光子发生跃迁, 但光场二阶作用会使原子实际能级有一个小的移动, 原子对光场的本征频率的影响亦有相似的效果. 这些效应被称为交流 Stark 效应. 上述 3 个基本效应反映了腔 QED 描述光与原子在受限空间中强耦合的基本特征. 对于固体系统, 只有在实验上观察到上述特征, 我们才能说, 实现了固态系统的腔 QED.

利用固态系统实现人工原子有许多种方式, 但目前保持相干性最好的固态人工原子是基于超导约瑟夫森结的电荷量子比特和磁通量子比特<sup>[8]</sup>. 下面仅介绍前者. 大家知道, 对于电容很小( $\mu\text{F}$ )的约瑟夫森结(如图 3), 库仑岛上增减一个库珀对, 其电荷能会有很大的变化. 门电压可以控制成如图 1 所示的库仑岛的静电势能  $E_n = E_c(n - n_g)^2$ , 其中  $E_c$  为

单位电荷充电能,  $n$  为库仑岛上的多余的库珀对数目,  $n_g$  依赖于门电压. 当  $n_g = 1/2$  时,  $E_0$  和  $E_1$  是简并的. 由于存在约瑟夫森隧穿, 这些简并会被分开, 形成一个人工的二能级原子——电荷量子比特. 为了有足够多的可操纵参数, 人们用超导量子干涉器件(SQUID)代替单结, 穿过 SQUID 的磁通是门电压以外的另一个可操纵参数.

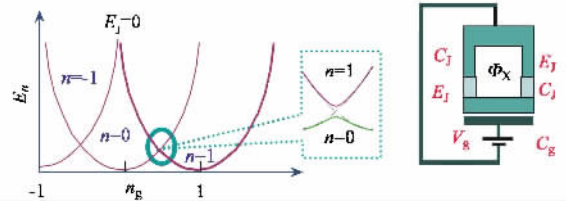


图 3 基于超导约瑟夫森结的人工二能级原子 - 电荷量子比

耶鲁大学的研究小组首先设想利用一个超导导线形成微腔 QED 结构中的单模电磁场[图 4(a)]<sup>[10,13]</sup>. 作为一个传输线, 两端的截断为超导体表面的电磁场提供了一个零值的边界条件, 从而形成一个本征频率分立的驻波, 导致了空间上的电压分布. 把电荷量子比特刻蚀在超导传输线附近, 便可以产生这个二能级人工原子与单模电磁场的相互作用, 形成了新型的腔 QED 结构. 这种电路 QED(circuit QED)和传统的腔 QED 相比具有明显的腔 QED 特征[图 4(b)]. 他们后来的实验的确展示了明显的腔 QED 行为: Rabi 劈裂和交流 Stark 效应. 人们还可以利用电容较大的约瑟夫森结实现腔 QED 结构. 对于一个大结而言, 其隧穿能量  $V = E_J \cos\theta$  ( $E_J$  为隧穿系数), 可近似地展开为序参量  $\alpha$  (超导位相) 的二次函数. 因此可以量子化为腔 QED 中的单模场. 我们较早提出了这个观念<sup>[5]</sup>, 后来荷兰 Delft 研究小组在实验上独立地展示了这个效应<sup>[14]</sup>.

## 3 纳米机械谐振器的量子效应

以上介绍了基于超导电路的腔 QED 结构的物理实现. 最近实验表明<sup>[15,16]</sup>, 纳米技术进步使得人们能够实现 GHz 振动的纳米尺度的悬臂(nano beam). 在 4—5  $\mu\text{K}$  温度下, 热涨落被大大压低. 这种振动已接近标准量子极限, 从而可以展示其丰富的量子力学效应. 利用这种高频振荡的纳米器件与单自旋或与超导量子比特耦合, 有可能实现另一类新型的腔 QED 结构, 这方面的各种理论方案已经提出, 实验已取得初步进展.

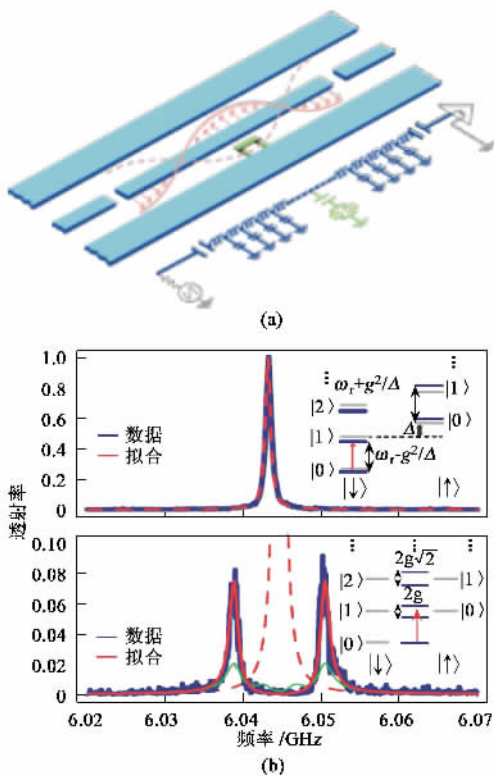


图4 (a)超导传输线与电荷量子比特的耦合；  
(b) Rabi 劈裂

通过电学耦合形成的纳米机械 QED 可以展示各种各样的腔 QED 效应,如坍塌与复苏效应( collapse and revival ). 在我们发表的研究工作中指出<sup>[3]</sup>,探测电荷量子比特对纳米机械能量的吸收,腔 QED 的强耦合作用使之不再是简单的周期振荡,而是先从高吸收端瞬间跳到一个常值,然后几乎保持一个常值,然后再恢复到振荡的高端.当然,由于固态器件存在各种噪声,如起主导作用的低频  $1/f$  噪声和各种非线性噪声<sup>[4]</sup>,这些典型的腔 QED 效应因而会被减弱.在光-原子系统中,这种效应表现得更为明显,而对固态系统需要改进测量技术,才有可能直接观察到这种效应.

大家知道,测不准原理是否能明显地起作用,是判断一个物理体系是否需要量子化描述的一个定量标志.但是由于测不准原理是对两个共轲变量的同时测量加以限制,原则上对其中之一可以测得任意精确.但是,关于时间间隔和空间距离(而非位置测量)的测量,必须由两次相继的点测量构成,第一次测量的扰动会影响第二次测量,从而对间隔的测量加以基本限制.这个限制就是标准量子极限.判断一个纳米器件是否需要量子化,就必须考虑对它的测量精度是否接近标准量子极限.最近,IBM 和加州大学的研究小组在实验上实现了对纳米尺度的悬臂具

有 4—5 个标准量子极限的高精度测量<sup>[15—17]</sup>.而波士顿大学的研究小组声称他们已经直接观察到量子化的纳米谐振器从激发态到基态的量子跃迁<sup>[18]</sup>.但目前对这个实验还存在诸多争论.

高频纳米谐振器的一个重要应用是用它来探测单电子自旋. IBM 的另一个研究小组最近完成了这样的实验<sup>[17]</sup>.在他们的实验中,一个磁性针尖被“粘”在纳米悬臂上.这个针尖在自旋所在的位置产生较强的磁场,从而与电子的内禀磁矩耦合起来.同时,对电子施加一个与电子自旋劈裂近共振的微波场.当它与高频纳米谐振器远离共振时,处在不同本征态的自旋会对纳米悬臂的振动频率产生不同的移动.通过光学干涉的办法,他们能以相当高精度探测到这种频率移动的存在.当然在这个实验中,纳米悬臂振动的频率只是 MHz,还没有达到标准量子极限所要求的 GHz.

我们相信,在不久的将来,一旦实现了量子化的 GHz 的纳米悬臂与单自旋的耦合,便可以得到一个基于机械系统的腔 QED 结构,我们暂称之为纳米机械 QED.事实上,最近已有许多理论方案探讨这种纳米机械 QED 效应的存在,不过他们采用的不是与单电子自旋的耦合,而是与超导电子比特的耦合,其耦合原理如图 5 所示<sup>[11]</sup>.当纳米悬臂振动时,它将改变自己的空间位置,从而与作为二能级人工原子的电荷量子比特耦合起来,形成典型的纳米机械 QED 结构.需要指出的是,一个电荷量子比特的能级差和纳米悬臂的振动频率可以达到相同的量级,从而形成强耦合.

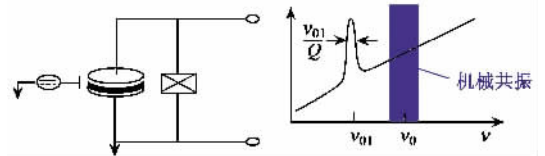


图5 GHz 高频振荡的纳米器件与单自旋或与超导量子比特耦合

#### 4 $\Delta$ 结构人工原子的相干操纵

众所周知,对称性决定了量子跃迁的选择定则.支配自然原子跃迁的电偶极相互作用具有奇宇称,而且有  $SO(3)$  或  $SO(4)$  对称性的原子能级也具有特定的宇称.所以,电偶极相互作用只能引起原子从一个能态跃迁到具有不同宇称的另一个能态上.从而,三能级自然原子的电偶极跃迁,只有  $V$ ,  $\Lambda$  和  $\Xi$

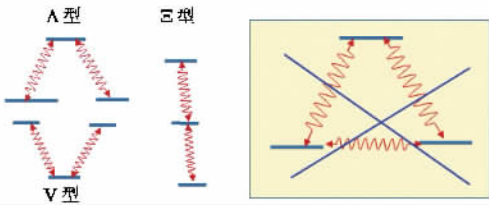


图6 SO(3)或SO(4)对称性支配的自然原子电偶极跃迁的选择定则

### SO(3)与SO(4)对称性

在一般的中心力场中运动,粒子具有由SO(3)群描述的旋转对称性.因此,它的能级可以根据SO(3)群的不可约表示加以分类,并且每一个不可约表示的维数就是该不可约表示对应的能级的简并度.我们可以充分利用这种对称性,通过Wigner-Ekert定理,确定各类跃迁的选择定则.

然而,对于氢原子等碱金属原子其中心力场是一个平

方反比的特殊中心场,其能级简并度高于一般中心力场用SO(3)群标志的对称性.因此,体系可能存在更高的对称性.泡利等人发现这个对称性就是SO(4).它除了包含SO(3)的角动量算子作为生成元,还包含另外三个算子Lentz矢量.这6个元素生成了SO(4)对称性群.这个对称性通常称为隐藏的动力学对称性,它不但可以准确描述氢原子和类氢原子的能级简并情况,而且决定了电偶极跃迁的选择定则.

其实,有SO(3)或SO(4)对称性的原子能级具有特定的宇称,而电偶极相互作用具有奇宇称.因而电偶极相互作用只能引起原子从一个能态跃迁到具有不同宇称的另一个能态上.从而三能级自然原子的电偶极只有如图6所示的前三种基本结构,而图示的 $\Delta$ 结构原子是不存在的.

### 手征分子(Chiral molecular)

手征分子,又称手性分子.在化学上,化合物分子或某种分子团簇的构型可以排列成镜像不能完全重叠的两类同分异构体,它们有如人的双手,有相同的构成,但在构型上又略有差别.严格地讲,只有当一种分子的全部可能构象都是手征的,我们才能称之为手征分子.手征性导致了化学上分子旋光效应的发生.在自然界,生物大分子的确存在着左手系和右手系的两类不同的旋光异构体.手征分子的存在,导致了手征药物的发明,通过对不同手征的价电结合能力,可以治疗手征疾病.

从物理上讲,分子手征性意味着空间反演对称性破缺.如图7所示,空间对称性破坏有两种可能:一种是内禀的对称性破坏,由于环境或基本相互作用的差异,体系具有不对

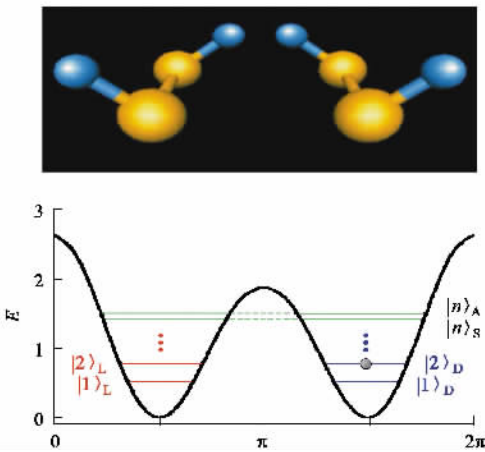


图7 手征分子及其对称性破缺

称的势,从而由于对称性决定的体系的跃迁选择定则发生了根本性的改变;另一种是自发对称性破坏:因为体系的基态是简并的,一旦一个粒子占有其中一个基态,则以后的粒子倾向于沿着这种不对称的趋势布居,从而形成更大程度上的不对称性,形成手征.从基本物理学的角度,理解手征性的起源是当代科学面临挑战的一个基本问题.

型三种基本结构, $\Delta$ 结构原子是不存在的.

当然,由于对称性的破坏,手征分子也会有 $\Delta$ 型的跃迁结构存在<sup>[19]</sup>,但跃迁强度是有差别的.然而,对于超导电路实现的约瑟夫森人工原子而言,原则上可以实现一些奇异的原子结构,如利用3个结的磁通量子比特可以实现具有循环结构的 $\Delta$ 型三能级原子.我们与日本理化学研究所Franco Nori研究小组的合作<sup>[2]</sup>,首次发现了这种奇异的人工原子结构的存在.我们考虑了如图8所示的三结超导

约瑟夫森电路.当外磁通 $\Phi_e$ 是半个磁通量子时,相对于超导位相变量的势能是对称的.外加的微波场与这个超导环的相互作用具有确定的宇称.因此,超导人工原子微波跃迁的选择定则与自然原子的电偶极跃迁的选择定则是一样的.单光子跃迁和双光子跃迁不能共存.但是,如果外磁通偏离 $\Phi_0/2$ ,相互作用哈密顿量和势场的对称性均发生破缺,通常的选择定则不再保持,从而出现了一个奇异的物理现象:微波单光子和双光子跃迁共存.

## 5 基于全固态结构腔 QED 的纳米机械谐振器的冷却方案

如上指出, 现代的微加工技术已经能够在实验上实现品质因子达到  $10^2-10^5$  的纳米机械谐振器。在物理上, 这个纳米器件可以用来展示各种介于经典和量子之间的新奇量子现象。然而, 为了使其量子特性充分表现出来, 必须采取各种方案对之加以进一步冷却, 使之接近基态。目前已有各种方案来冷却纳米机械谐振腔, 如控制反馈和边带冷却等。不过这些方案只是在谐振器初态的平均声子数很大时才是有效的; 当谐振器的平均声子数较低时, 进一步冷却就变得比较困难了。为了克服这个困难, 最近我们基于电荷量子比特与纳米机械谐振器的耦合(图 10), 提出了一种新的冷却机制<sup>[1]</sup>。

为了直观地理解我们的理论方案, 可以做一个形象的经典类比: 要把一个盒子里空气的温度降低, 可以往盒子里放冰块, 待冰块化成水以后, 我们把水从盒子里取走, 然后通过某种机制再把这些水冻结成冰, 重新放回盒子里。这样的过程循环往复, 直至最后把盒子中空气整体地冷却到与冰一样的温度。在我们的纳米谐振腔冷却方案中, 纳米谐振腔就是盒子及其中空气, 基态上的电荷量子比特就是经典方案中的冰, 而激发态上的电荷量子比特是冰融化的水。现在关键是, 什么是周期地凝水成冰的物理机制? 什么是相应的操作控制方法?

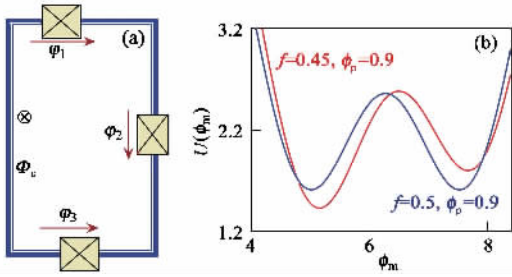


图 8 三结超导约瑟夫森电路与对称性破缺有效势

在我们的理论研究中, 通过数值计算, 仔细地分析了三结超导环的能级结构。选取 3 个能形成循环跃迁的最近的 3 个能级形成所谓的  $\Delta$  结构人工原子。当应用 3 个具有不同位相的微波模式去激发这个人工原子时, 我们发现这种量子绝热操纵对于总的位相具有明显的敏感性。而这种敏感性对于通常的三能级结构原子是不存在的, 对于  $\Lambda$  型、 $V$  型和  $\Xi$  型原子的绝热操纵, 只有控制场的振幅才起作用。在图 9 中, 通过数值计算, 画出微波操纵过程中体系的瞬时能级对总位相的依赖关系。相应地, 还计算了绝热演化原子保持在原来状态上的几率。此类奇异结构人工原子的第一个应用就是由它作为单光子光源, 我们考虑通过经典光(或微波)的相干操纵, 在能级  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  之间产生单光子受激辐射的可能。

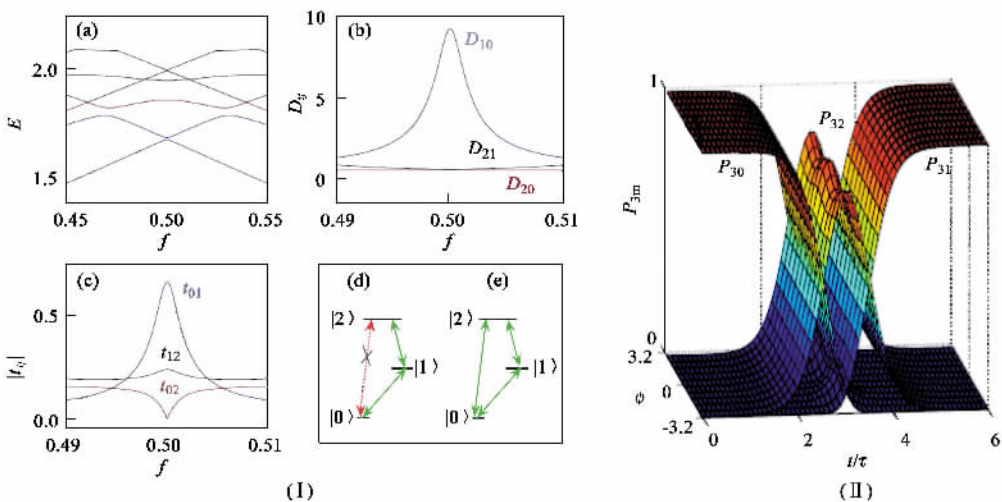


图 9 ( I ) 三个能级结构人工原子 ; ( II ) 量子绝热操纵对于总的位相的敏感性

需要首先指出的是,量子系统的耦合与经典类比有着本质的不同.在经典情况下,盒子中冰吸热融化是一个不可逆的过程,不存在冰和盒子之间周期性的能量相干交换.而电荷量子比特与纳米机械谐振器之间存在着相干的能量交换,既可以有能量从量子比特到纳米谐振器的转移,也可以发生相反的过程.我们的方案的关键步骤就是要及时地压低后一种过程.

在我们的方案[图 10(a)]中,理想的电荷量子比特被调节到能级交叉点  $n_g = 1/2$  上.这时,电荷量子比特的能级差主要由外部磁通决定.我们可以用脉冲信号控制这个有效能级差的大小,一旦这个能级差被调到远远大于谐振器的本征频率,二者之间的耦合便被关闭,这相当于把融水取出盒子,而当能级差被调到与谐振器共振,则耦合被开启,这相当于经典类比中把冰放进盒子里吸热.非常重要的一点是,作为电荷量子比特自发弛豫的主要机制,门电荷的涨落诱导的电荷量子比特的激发态衰变与其能级差成正比[图 10(b)].能级差越大,电荷量子比特从激发态弛豫到基态就越快,这正是在盒子外面快速“凝水成冰”的关键<sup>[20]</sup>.我们的冷却方案的高效性正在于利用电荷量子比特的这一重要性质.

我们的方案是由以下 4 个步骤组成[图 10(c)](1)通过脉冲的外磁场信号,把处于基态的量子比特和谐振器调到共振,(2)当量子比特主要处于激发态时,改变外磁通可以增加电荷量子比特的能级差,(3)当电

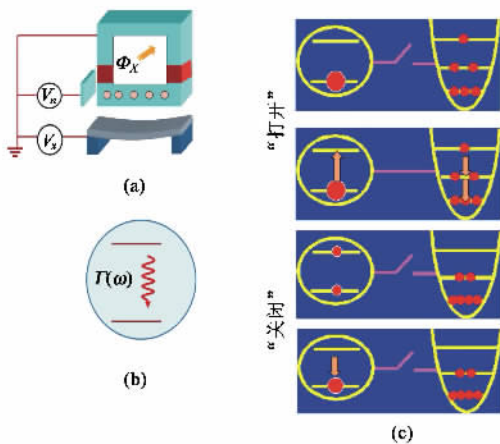


图 10 基于人工结构腔 QED 的纳米机械谐振器的冷却方案 (a)电荷量子比特与纳米机械谐振器的耦合示意图 (b)电荷量子比特激发态衰变  $\Gamma(\omega)$  与其能级差  $\omega$  成正比,  $\Gamma(\omega) \propto \omega$

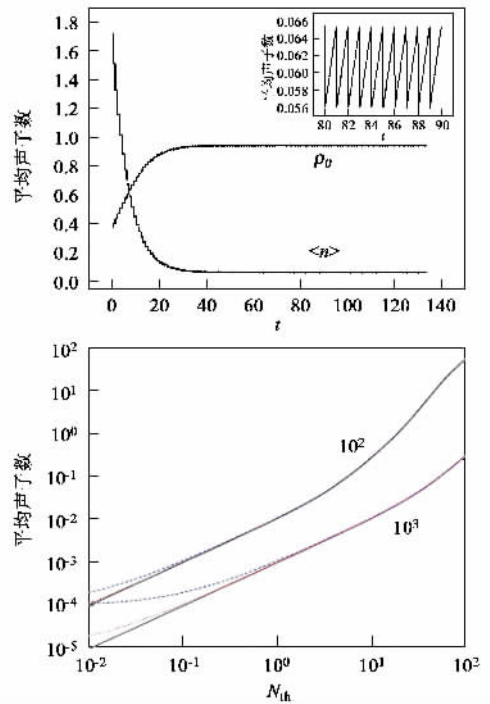


图 11 (a)纳米机械谐振器的平均声子数和处于真空态的几率 (b)冷却效果:平均声子数与初态的热声子数的关系

荷量子比特的能级差远大于谐振器的本征频率时,耦合被有效地关闭,然后电荷量子比特将很快又回到基态.(4)对回到基态的电荷量子比特,重复过程(1).这种过程循环往复,直至冷谐振器接近基态.

关于上述的纳米机械谐振器冷却方案,一个可能的质疑是:怎么可能恰好在特定的状态下,打开和关闭量子比特和谐振器的耦合?注意到这样做与“麦克斯韦妖”十分相似.知道了量子比特在基态上,就打开耦合,这意味着有某种形式上的量子测量,而量子测量意味着信息的损失.根据 Landauer 定理,这种信息擦除也意味着整体的能量损耗,而能量损耗可能会影响冷却效率.所幸的是,我们并不完全需要一个十分准确的脉冲信号.针对一般情况,我们应用与描述微波激光器一样的方法计算了这种冷却的效率.计算结果表明,即使控制脉冲是随机的,也能够达到很高的冷却效率.

如图 11 所示,假设初态的热声子数  $\geq 1.7$ ,我们计算了平均声子数和真空态几率.结果表明,在一个合理时间内,体系将达到一个稳态解,谐振腔将以接近于 1 的几率处在真空态上.我们研究的另一个理论预言是,通过增加量子比特的输入率(即关闭-打开耦合的速度),可以提高冷却效率.我们的冷

## 麦克斯韦妖 (Maxwell demon)

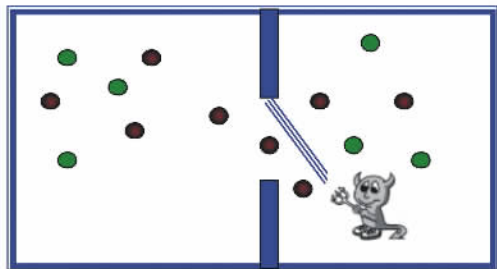


图 12 麦克斯韦妖示意图

麦克斯韦妖的观念,来源于 1871 年麦克斯韦本人在一书中关于热力学第二定律极限的讨论.他想象,在一个理想实验中(如图 12),一个被称之为妖的精灵,能够自由地打开容器中间隔壁上的阀门,并能准确地观察分子运动的速度.根据它自己观测的结果,当左边速度大于  $v$  的分子接近阀门时,它就打开阀门,让分子跑到右边;当右边速度低于  $v$  的分子接近阀门时,它就控制阀门,让低速分子跑到左边.从而使得左边的温度变低,右边温度变高,左右出

现温度差,可以让一个热机运行于它们之间对外做功.因此,整体的效果相当于一个单一热源会对外做功,与热力学第二定律矛盾.

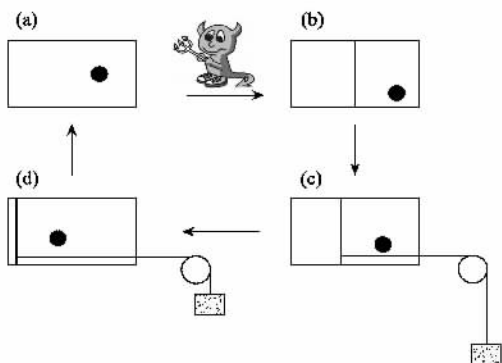


图 13 Szilard 热机原理图

1929 年,基于麦克斯韦妖,Leo Szilard 提出了一个具体的单分子热机模型(如图 13).热机循环分为三个步骤:(a)—(b)对于气缸中只有一个分子的系统,麦克斯韦妖测量分子在容器的左边还是右边,并记住测量得到的信息;(b)—(c)若在右边,在中间插入一个隔板变成活塞,然后单分子推动活塞做功;(c)—(d)最后,让系统与热库保持充分接触,最后恢复初始的平衡态.在这个理想实验中,Szilard 首先强调了麦克斯韦妖记忆的作用,但没有进一步分析其实质.

很多年以后,人们意识到,在 Szilard 热机中,虽然气体恢复到了初态,但在麦克斯韦妖的记忆里,仍然残存着气体状态的信息.要实现完整的热力学循环,必须擦除麦克斯韦

妖记忆中的信息,而根据 Landauer 定理,擦掉一个比特的信息,就要损耗  $kT \ln 2$  的能量.因此把妖和气体作为一个整体来考虑,就不存在违反热力学第二定律的佯谬.

Landauer 定理本质上与计算的物理极限有关,是导致量子计算发展的一个重要动机之一.任何一个不可逆计算过程,必须包含信息擦除或初始化,因此就要消耗一定的能量,产生热量.这种耗热现象必定限制传统计算机芯片的极限尺度. Bennet 针对可逆计算的情况也讨论了相同的问题.

却方案具有很大的普适性,完全可以推广到其他各种量子比特.

## 6 量子信息相关的基础物理问题研究展望

本文所介绍的内容,本质上属于量子信息和量子计算研究所启发的基础物理问题.在量子计算物理实现的研究中,稳定量子比特及其“数据总线”(data bus)系统的产生与控制,是当前量子信息的实用化的关键问题.我们关于纳米机械谐振器冷却方案理论研究的目的之一,就是为了实现稳定的固体“数据总线”.

虽然针对非固态量子比特系统,人们已成功地

演示了量子逻辑门操作和简单的量子算法,但量子计算实用化还需克服很多已知和未知的困难,逾越一些原理上和非原理上的障碍.为了在物理上实现有实际用途的量子计算机,需要把普适的量子逻辑门有机地集成起来,保持量子比特间的量子纠缠,并能对它们加以操控.随着集成量子比特数目  $N$  的增多,量子相干性损失(或称量子退相干, quantum decoherence)会变得越来越大,有时甚至呈指数增长关系.最近有研究表明,单粒子的量子相干性的损失呈指数衰变,但用 concurrence 表征的量子纠缠却会在有限的时间内丧失殆尽.这些结果表明,多量子比特简单集成后的量子相干性更加脆弱,原则上对目前的理论和实验提出了新的挑战.

从另一个角度看,实用化、可集成的量子计算



