

特邀综述

超导量子比特实验的开端

施郁

复旦大学物理学系 上海 200433

收稿日期:2022-06-01;接收日期:2022-06-06

【摘要】 我们对超导量子比特领域的科学背景、历史起源和早期发展做简要评述. 莱格特(Anthony J. Leggett)为这个领域打下了理论基础. 克拉克(John Clarke)和他的两个学生马丁尼(John Martinis)和德沃雷(Michel H. Devoret)最早通过偏电流约瑟夫森结,首次观察到约瑟夫森结的量子行为. 后来德沃雷实现了电荷量子比特叠加态、电荷-磁通混合量子比特的拉比共振和其他演化及投影测量. 中村泰信(Yasunobu Nakamura)首先实现电荷量子比特的量子叠加和拉比振荡,还参与莫伊(J. E. Mooij)组实现了磁通量子比特的拉比振荡和读出.

关键词: 超导量子比特,量子叠加,拉比振荡

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.02.001

The Beginning of the Area of the Superconducting Qubits

SHI Yu

Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433

Received date: 2022-06-01; accepted date: 2022-06-06

【Abstract】 We make a brief review of the scientific background, historic origin and early development of the area of superconducting qubits. Anthony Leggett lay the theoretical foundation. John Clarke and two students, John Martinis and Michel H. Devoret, for the first time, observed the quantum behavior of a Josephson junctions, by using the biased current Josephson junction. Later, Devoret realized quantum superposition of the charge qubits, as well as the Rabi oscillation, other evolution and projection measurement of the charge-flux qubits. Yasunobu Nakamura, for the first time, realized the quantum superposition and Rabi oscillation of charge qubits and participated the realization of the Rabi oscillation and readout of flux qubits by the group led by Mooij.

Keywords: superconducting qubits, quantum superposition, Rabi oscillation

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.02.001

Reference method: SHI Yu, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0097 (2022)

* 国家自然科学基金(项目号:12075059)资助的课题.

[†] yushi@fudan.edu.cn

1 引言

2021 年度“墨子量子奖”授予“开创了超导量子电路和量子比特中一系列早期关键技术”的三位科学家:加州大学伯克利分校的约翰·克拉克、耶鲁大

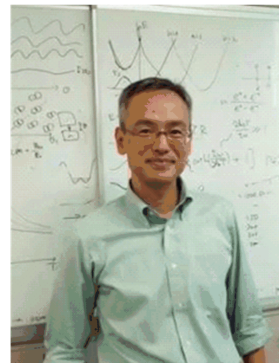
学的米歇尔·德沃雷,以及日本理化学研究所的中村泰信. 简单地说,他们的工作是超导量子比特实验的开端. 本文介绍这个领域的科学背景和发展历程,包括这三位科学家的贡献.



John Clarke Michel



H. Devoret



Yasunobu Nakamura

2 超导和超流

超导和超流经常被称作“宏观量子现象”. 但是通常情况下,它们只是微观量子行为的集体效应和宏观表现,并不是宏观变量的量子化.

微观粒子用量子态描述. 同种粒子,比如两个电子或者两个光子,是绝对完全一样的,叫做全同粒子. 按照统计性质,量子粒子分为两种. 一种叫做玻色子,自旋(内禀角动量)为整数. 任何两个同种玻色子(比如两个光子)可以处于相同量子态. 另一种叫做费米子,自旋为半整数. 任何两个同种费米子(比如两个电子)都不能处于相同量子态.

复合粒子的统计性质决定于总自旋是整数还是半整数,因此决定于它包含奇数个费米子还是偶数个费米子. 比如,由 2 个质子和 1 个中子组成的原子核叫做氦 3 原子核,是费米子,它又与 2 个电子组成电中性的氦 3 原子,也是费米子. 由 2 个质子和 2 个中子组成的原子核叫做氦 4 原子核,是玻色子,它又与 2 个电子组成电中性的氦 4 原子,也是玻色子.

在系统总能量最低时,简单来说(忽略相互作用),大量的全同玻色子都处在相同的最低能量状态,叫做玻色-爱因斯坦凝聚. 超流就是玻色-爱因斯坦凝聚的后果. 最常见的超流是氦 4 超流.

而费米子可以由某种机制导致两两配对,形成“库珀对”. 库珀对是个束缚态,近似于一个玻色子. 但是它的大小可以大于电子之间的平均距离,还要

注意电子的全同性,因此任何一个电子与任何一个其它电子形成库珀对. 超导态是这样各种情况的量子叠加状态. 库珀对的近似玻色-爱因斯坦凝聚也导致超流. 存在电中性的费米子超流,如氦 3 的超流. 最常见的费米子超流是固体中的电子库珀对的超流,一般称作超导电性(因为电子带电),简称超导. 对于很多物理问题来说,可以近似将超导体看成由库珀对组成.

基于库珀对凝聚的超导理论于 1956 年,由巴丁(John Bardeen),库珀(Leon Cooper)和施里弗(John Robert Schrieffer)提出. 他们的理论中,库珀对的总自旋为 0. 而氦 3 超流的库珀对总自旋为 1. 对氦 3 超流的理论做出贡献的莱格特因此获得 2003 年诺贝尔物理学奖. 安德森(Philip Anderson)等人对此也有重要贡献.

玻色-爱因斯坦凝聚、超流或者超导都可以由一个序参量描写,有时被称为宏观波函数,它是一个复数函数. 粒子之间作用力比较弱时,可以用平均场理论来描述,假设所有全同粒子的波函数一样,它们相乘在一起,就构成系统的整体波函数. 因此在这种情况下,每个全同粒子的单体波函数就是序参量(通常再乘以粒子数的平方根). 但对于相互作用较强的情况,序参量是规范对称自发破缺所导致的场算符的期望值,或者是单玻色子或者双费米子约化密度矩阵的最大本征值的本征函数. 后者对应于彭罗斯-翁萨格(Penrose-Onsager)和杨振宁的非对角长程序.

3 粒子数与相位是量子共轭算符

不管理论上以何种方式得到,序参量(或称宏观波函数)的一个重要特征是相位. 相位随着位置的变化驱动了超流. 约瑟夫森效应体现了这个相位的物理真实性. 对于由绝缘体薄层隔开的两个超导体,两个超导体的宏观波函数的相位差直接导致穿过绝缘体的超导电流,电流强度正比于相位差的正弦函数,这就是约瑟夫森效应. 它是剑桥大学研究生约瑟夫森(Brian Josephson)在学习安德森的超导课程时,用多体微观理论得到的结论. 宏观波函数的相位差是一个宏观变量,但是由于粒子数涨落很大,相位成为一个经典变量.

对于小约瑟夫森结,相位也有涨落,粒子数与相位都成为量子力学算符,而且它们具有共轭关系,类似位置和动量之间的关系,也就是互不对易(改变作用顺序,结果不同). 这也使得它们之间也服从海森堡的不确定关系.

1980年,莱格特指出^[1],通常所谓的“宏观量子系统”,即超导和超流,以及磁通量子化和约瑟夫森效应这些后果,并没有表明量子力学原理适用于宏观系统,因为其中并没有宏观上的不同状态之间的量子叠加(如假想的薛定谔猫),但是由于在超导或超流状态下,耗散低,超导器件特别是 SQUID(超导量子干涉仪,即具有两个约瑟夫森结的超导环),通过特别的设计,适合于寻找不同宏观状态之间的量子叠加或量子隧穿. 这引领了几十年约瑟夫森结的量子效应的研究,包括超导量子比特的兴起^[2].

4 约瑟夫森结量子行为的首次实验观察

1985年,作为加州大学伯克利分校教授的克拉克带领两位学生马丁尼和德沃雷(Michel Devoret),首先观察到偏电流约瑟夫森结的量子行为^[3]. 偏电流是指外电流. 具体来说,他们观察到量子化的能级,表明了约瑟夫森结的相位差确实是一个量子力学算符,实验结果与理论一致.

描述这个系统的方程类似于一个质点的一维运动,约瑟夫森结相位差对应于质点位置. 对应后,质点所受的势能作为位置的函数,是倾斜的余弦函数. 在约瑟夫森结中,这个倾斜由偏电流引起. 约瑟夫森

结的零电压态对应于质点的势能低点(叫做势阱). 量子力学预言,在势阱中,质点处于所谓束缚态(指束缚在势阱中),而且所能具有的能量是分立的,叫做能级——也就是说,只有某些特定的数值才被允许,这叫能量量子化. 原子中的电子就具有这个性质. 具有如此能级结构的人工器件有时被称作人造原子,可以用约瑟夫森结实现,也可以用半导体量子点实现.

克拉克和两位学生将约瑟夫森结用微波辐照,发现当微波频率(乘以普朗克常数)等于分立能级之差时(几个 GHz),“质点”逃逸率(逃逸出势阱的概率)大大增加,也就是说,约瑟夫森结两端的电压以及导致的电流大大增强. 这是一种共振,类似于,如果电磁波的频率(乘以普朗克常数)与原子中的电子能级差相等,低能级的电子就会吸收光子,跃迁到高能级. 他们观测到,随着温度升高,逃逸率从量子共振激发过渡到经典热激发. 就这样,约瑟夫森结的量子行为首次得到证明,而且表明可以通过电路对它进行控制,并能将多个约瑟夫森结连结起来.

短短两年后,克拉克因此分享了1987年度的低温物理菲列兹·伦敦奖(Fritz London Memorial Prize).

1988年,这个研究组又发表了在这个系统中,在低温下,测量从零电压态的逃逸率,与基于宏观量子隧穿的预言一致,表明了约瑟夫森结的相位差确实是一个宏观量子变量^[4]. 莱格特教授告诉我,他认为这比能级量子化更重要.

克拉克他们的约瑟夫森结材料是 Nb-NbO_x-PbIn,中间的氧化铌是绝缘体,两边的铌和铅铟合金是超导体. 后来人们改用 Al-Al₂O₃-Al,即铝-氧化铝-铝,它的耗散更低^[5].

5 小约瑟夫森结

约瑟夫森结的能量来自两个互相竞争的部分. 一是库珀对带来的充电能,等于充电能常数(一对库珀对的充电能)乘以库珀对数目(减去一个所谓的门电荷数)的平方. 另一个是约瑟夫森隧道耦合能,是库珀对隧穿导致的负能量(当库珀对波函数是隧道两边的叠加态时,能量降低),等于负的约瑟夫森能量常数(临界电流乘以磁通量子,除以 2π)乘以相位

差的余弦。

1990年代,很多研究组研究小约瑟夫森结^[6]. 代尔夫特工业大学的莫伊组研究了约瑟夫森结阵列^[7],哈佛大学的廷卡姆(Tinkham)组观察到超导体单电子晶体管的电流-电压关系中的 $2e$ 周期性^[8],当时在法国萨克莱(Saclay)原子能委员会的德沃雷组也证实了这个结果^[9],莫伊组证明了相位与电荷(库珀对数目乘以电子电荷)之间的海森堡关系^[10].

6 量子计算的兴起

1980年代,量子计算的研究开始出现. 1990年代早期,肖尔(Peter Shor)提出可以有效解决因子化问题的量子算法,使得量子计算得到更广泛的关注. 当时,量子计算的物理实现主要在光子、离子、原子这些系统中研究,而固体物理系统被认为太复杂,自由度太多. 1990年代后期,研究超导约瑟夫森结和半导体量子点的科学家开始对量子计算感兴趣,试图实现量子比特. 当时仍然有很多科学家不知道这个领域. 记得世纪之交时,笔者向一位知名凝聚态理论学者说起对凝聚态系统中的量子纠缠与量子计算实现有点兴趣,对方不知道什么意思.

固态“人造原子”有其优点,它可以借由电路实现仔细的调控,因为相对于真正的原子,更容易调控各种参数,而且也容易和传统的技术整合,便于扩展到很多量子比特.

对于任何用来实现量子计算的物理系统,首先要解决的问题是量子比特的物理实现,包括单个量子比特以及不同量子比特的耦合. 下文主要回顾单个超导量子比特的实现.

7 超导量子比特

超导量子比特有很多种. 当充电能比约瑟夫森能大很多时,相位涨落大,库珀对数目接近明确,所实现的量子比特叫做电荷量子比特,又叫库珀对盒子. 当约瑟夫森能比充电能大很多时,粒子数涨落大,相位明确,所实现的量子比特叫做相位量子比特,也可实现磁通量子比特. 另外还有 quantronium, transmon, fluxonium,等等.

1998年,Devoret组证明了电荷量子比特叠加态的存在性^[11].

1999年,当时在日本 NEC 实验室的中村泰信及其合作者帕什金(Yu A. Pashkin)和蔡(J. S. Tsai)实现了电荷量子比特的叠加态^[12]. 他们用电压脉冲,实现了相差一对库珀对的两个粒子数本征态的量子叠加. 虽然相干时间(维持叠加态的时间)只有2纳秒,但是脉冲时间只有100皮秒. 后来,他们又实现了在微波作用下,这两个电荷本征态之间的拉比振荡^[13].

2000年,纽约州立大学石溪分校的卢肯斯(Lukens)组^[14]和代尔夫特的莫伊组^[15]分别在特别设计的、包含3个约瑟夫森结的超导环中,实现了不同电流方向(顺时针和逆时针)的量子叠加态. 这也叫磁通量子比特,因为两个方向的电流对应不同的、穿过环路的磁通量. 但是量子叠加的证据是间接的,来自光谱^[14].

2002年,在萨克莱和耶鲁大学的德沃雷组用围绕一个库珀对盒子巧妙设计的超导电路,以哈密顿量的两个本征态作为量子比特,实现了任意么正演化(包括拉比振荡)以及投影测量^[16]. 他们自己称这个量子比特为 quantronium. 这是电荷-磁通混合量子比特^[17],自由演化时,对电荷和磁通噪声都不敏感,等效于电荷量子比特,而读出时又改变控制参数,对磁通敏感,等效于磁通量子比特.

与此同时,堪萨斯大学的韩思远组发表了偏电流约瑟夫森结的两个本征态之间的拉比振荡^[18]. 当时在科罗拉多的 NIST 的马丁尼组也观察到同样的现象. 偏电流约瑟夫森结也就是1985年卡拉克、马丁尼和德沃雷最初研究的系统,它的两个本征态对磁通噪声敏感度低于磁通量子比特^[17]. 它们被称为相位量子比特^[20,21],因为约瑟夫森能比充电能大很多.

2003年,莫伊组实现了磁通量子比特的拉比振荡和读出^[22]. 当时中村泰信在该组访问,是该工作的合作者.

后来这个领域又取得了长足的进展,包括双量子比特和多量子比特的耦合,直到最近用几十个量子比特实现量子优越性^[23,24]. 这里不再赘述.

置于微波腔中的超导量子电路还导致所谓电路量子电动力学,电磁波显示出量子行为. 比起基于腔量子电动力学(原子与光子耦合)的量子门和读出,

基于电路量子电动力学的量子门和读出快 1000 倍,但是退相干也快 1000 倍,不过电路量子电动力学能获得大量数据^[5].

莱格特一直在推动用 SQUID 检验是否存在宏观不同的状态的量子叠加^[23].最近的一个磁通量子比特实验说明,至少对于 10 纳秒、170 纳安培的电流,存在两个方向电流状态的量子叠加^[26].

8 总 结

通过我们的回顾综述,可以看到,克拉克和他的学生马丁尼和德沃雷最早通过偏电流约瑟夫森结,首次观察到约瑟夫森结的量子行为.后来德沃雷又

做了一系列工作,包括 1998 年证明了电荷量子比特叠加态的存在性,2002 年实现电荷-磁通混合量子比特的拉比共振和其他演化及投影测量.中村泰信 1999 年和 2001 年分别首先实现超导量子比特的量子叠加和拉比振荡,是在电荷量子比特中.他 2003 年还参与莫伊组实现了磁通量子比特的拉比振荡和读出.

作者感谢莱格特(Anthony J. Leggett)教授的有益讨论.作者受国家自然科学基金(项目号:12075059)资助.

参 考 文 献

- [1] A. J. Leggett, Macroscopic quantum systems and the quantum theory of measurement, *Progr. Theor. Phys. (Suppl.)* **69**, **80**, (1980).
- [2] A. J. Leggett, Josephson Devices as Tests of Quantum Mechanics Towards the Everyday Level, F. Tafuri (ed.), *Fundamentals and Frontiers of the Josephson Effect*, Springer Ser. Materials Vol. 286 (Springer Nature Switzerland AG) pp. 63-88.
- [3] J. Clarke, A. N. Cleland, M. H. Devoret, D. Esteve, J. M. Martinis, Quantum Mechanics of a Macroscopic Variable: The Phase Difference of a Josephson Junction, *Science* **239**, **992** (1988).
- [4] J. M. Martinis, M. H. Devoret and J. Clarke, Energy level quantization in the zero-voltage state of a current-biased Josephson junction, *Phys. Rev. Lett.* **55**, **1543** (1985).
- [5] J. M. Martinis, M. H. Devoret and J. Clarke, Quantum Josephson junction circuits and the dawn of artificial atoms, *Nature Physics* volume 16, pages **234** (2020).
- [6] J. E. Mooij, The first Delft qubit, *QuTech Blog*. [5] L. J. Geerligs, M. Peters, L. E. M. de Groot, A. Vebreggen and J. E. Mooij, Charging effects and quantum coherence in regular Josephson junction arrays, *Phys. Rev. Lett.* **63**, **326** (1989).
- [7] M. T. Tuominen, J. M. Hergenrother, T. S. Tighe and M. Tinkham, Experimental evidence for parity-based 2e periodicity in a superconducting single-electron tunneling transistor, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1997 (1992).
- [9] P. Lafarge, P. Joyez, D. Esteve, C. Urbina and M. H. Devoret, Two-electron quantization of the charge on a superconductor, *Nature* **422**, **422** (1993).
- [10] W. J. Elion, M. Matters, U. Geigenmüller and J. E. Mooij, Direct demonstration of Heisenberg's uncertainty principle in a superconductor, *Nature* **371**, **594** (1994).
- [11] Quantum coherence with a single Cooper pair, V. Bouchiat, D. Vion, P. Joyez, D. Esteve and M. H. Devoret, *Physica Scripta* **T76**, **165** (1998).
- [12] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin and J. S. Tsai, Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box, *Nature* **398**, **786** (1999).
- [13] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin and J. S. Tsai, Rabi oscillations in a Josephson-junction charge two-level system, *Phys. Rev. Lett.* **87**, **246601** (2001).
- [14] J. R. Friedman, V. Patel, W. Chen, S. K. Tolpygo and J. E. Lukens, Quantum superposition of distinct macroscopic states, *Nature* **406**, **43** (2000).
- [15] C. H. van der Wal, A. C. J. ter Haar, F. K. Wilhelm, R. N. Schouten, C. J. P. M. Harmans and J. E. Mooij, Quantum superposition of macroscopic persistent-current states, *Science* **290**, **773** (2000).
- [16] D. Vion, A. Assime, A. Collet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve and M. H. Devoret, Manipulating the quantum state of an electrical circuit, *Science* **296**, **887** (2002).
- [17] A. J. Leggett, Superconducting Qubits—a Major Roadblock Dissolved? *Science* **296**, **861** (2002).
- [18] Y. Yu, S. Han, X. Chu, S.-I. Chu, Z. Wang, Coherent Temporal Oscillations of Macroscopic Quantum States in a Josephson Junction, *Science* **296**, **889** (2002).
- [19] J. M. Martinis, S. Nam and J. Aumentado, Rabi oscillations in a large Josephson-junction qubit, *Phys. Rev. Lett.* **89**, **117901** (2002).
- [20] J. Clarke, Flux qubit completes the hat trick, *Science* **299**

(2002), 1850

- [21] J. Q. You and Franco Nori, Superconducting Circuits and Quantum Information, *Physics Today* 58(11), **42**(2005).
- [22] I. Chiorescu, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans and J. E. Mooij, Coherent quantum dynamics of a superconducting flux qubit, *Science* 299, **1865**(2003).
- [23] F. Arute, et al. , Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature*, 574, **505** (2019).
- [24] Y. Wu et al. , Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor, *Phys. Rev. Lett.* 127, **180501** (2021).
- [25] A. J. Leggett, 公众演讲:“日常世界真的服从量子力学吗?”, 施郁主持并翻译, 对话嘉宾:潘建伟、陈宇翱, 2020 年 12 月 27 日, https://www.cdstm.cn/subjects/kjgldkxk/kxkzb/kxlx/202012/t20201221_1039348.html
- [26] George C. Knee, Kosuke Kakuyanagi, Mao-Chuang Yeh, Yuichiro Matsuzaki, Hiraku Toida, Hiroshi Yamaguchi, Shiro Saito, Anthony J. Leggett & William J. Munro, A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit, *Nature Communications* volume 7, Article number: 13253 (2016).