

刘闯

2015301020059

2018年6月28日

近代物理专题报告

量子计算

19世纪末，人们发现旧有的经典理论无法解释微观系统，于是经由物理学家的努力，在20世纪初创立量子力学，解释了这些现象。量子力学从根本上改变人类对物质结构及其相互作用的理解。其中，量子叠加，量子纠缠，量子退相干等几个主要的理论对现今的量子计算产生了巨大的影响

以量子退相干为例，在叠加态里，几个相互正交的量子态叠加在一起，彼此相干。量子退相干是一种过程，能够将量子系统的约化密度矩阵对角化，而相干性质就是表示于这约化密度矩阵的非对角元素，所以，叠加态的相干性质会快速消失，无法再被探测到，从而呈现出经典的统计性质。在一台量子计算机中，需要多个量子状态尽可能地长时间保持叠加。退相干时间短是一个非常大的技术问题，因为它会削弱量子叠加效应，但它也是一个必需的因素，因为储存在计算机内的数据必需经过量子测量被读出来。

量子计算机是一种使用量子逻辑进行通用计算的设备。不同于传统计算，量子计算用来存储数据的对象是量子比特，它使用量子算法来进行数据操作。最早发现的量子算法主要有两类：一类可以归结为质因数分解（Shor 算法），比已知最快经典算法有指数加速（准确说是超多项式加速）；另一类可以归结为无序搜索（Grover 算法），比经典算法有多项式加速。其中shor算法在密码学领域的重大突破，给信息安全带来很大的冲击。不过想运行 Shor 算法破解密码需要有至少上百万个量子比特的通用、容错量子计算机，这其中的任何一个条件在短时间内都无法实现。

在2008年，Aram Harrow、Avinatan Hassidim 和 Seth Lloyd 提出了 HHL 算法：在一系列前提假设下，量子计算机可以在对数复杂度内求解一些特殊的线性方程组。线性方程组在现代计算中可以说是无处不在，是很多拟合、推断、优化问题的基础。而且，一些衍生出来的算法只需要有50到100个量子比特的小型量子计算机就能展现出优势。这是现代技术有可能实现的。然而，HHL 不是一个具体算法，而是一个在特殊假设和限制条件下的算法模版，或者说是一个完整算法的一部分。没有数据的读入读出，没有具体的参数演化，并且有非常苛刻的适用范围。任何一个细节条件不满足，量子加速都会消失。以 HHL 为模版设计一个具体算法就需要填补上这些细节，但极少有实际问题满足全部的限制条件。

实现量子计算的基础是单量子态的操纵和测量。最开始发展的两个主要实验方向以Haroche和Wineland为主。Haroche 创造的实验系统：腔量子电动力学——让处于极高激发态的原子一个个地飞过微波腔，与腔中囚禁的一个或几个光子相互作用，用原子控制和测量光子的量子态；以及Wineland 使用实验系统：离子阱——用激光冷却和射频电场囚禁一个或几个带电离子，再用电磁场和激光对离子进行量子操纵和测量。

1989年，David Wineland 实验室首次实现了汞离子的基态冷却，离子阱走入量子时代。早期，离子阱主要的发展动力是精密测量，例如测量电子反常磁矩、提供超高精度频率标准（原子钟）等。直到1995年，科学家们才意识到这是一个非常理想的量子计算平台。21世纪的头十年里，离子阱几乎在各类量子计算实验系统中保持绝对领先，它最明显的优势有：干净：单个或几个离子是干净的无杂质系统，量子相干时间很长；精密：离子的量子逻辑门和测量的保真度 (fidelity) 很高；容易多体纠缠：任意两个离子之间都可以相互作用（产生纠缠）。另外，自然中的同种原子是完全相同的，离子阱也特别适合模拟量子多体系统。但是，他也有很多很明显的缺点。例如慢：天然原子与光子的相互作用强度有限，导致离子的控制和测量都很慢；实验手段复杂：冷原子类实验都需要非常精巧复杂的激光、真空和电磁场装置。集成困难：离子依靠电磁场“悬浮”在阱中。同一个阱中最多也就囚禁十几到几十个完全可控的离子，大规模集成几乎不可能。

离子阱的明显缺陷，也给了另一种实验系统发展机会。英国物理学家 John Clarke 和 Michel Devoret，John Martinis，使用一种叫 Josephson 结的超导体-绝缘体-超导体三明治结构试图观测宏观量子现象，并通过宏观量子隧穿和微波谱的测量得到了明确结论——在极低温下，Josephson 结的宏观相位遵守量子力学规律。这一重大发现后，全世界的各大实验室开始对超导量子电路的研究，并先后实现了几类不同超导体人造原子的量子叠加。超导量子电路最大优势在于它可以在宏观尺度上对光子和原子进行相互控制和测量。它的各种参数和性质通过设计在很大范围内进行调整，让科学家可以通过工程方法解决各种实验问题。这使得它相比天然原子快：通过器件设计可以增大原子光子相互作用强度，实现纳秒速度的量子逻辑门。实验手段简化：超导量子电路需要在 20 mK 以下的极低温工作，这个工作条件很容易实现，无需各种复杂的激光冷却和囚禁装置。但是超导量子电路也有一些缺陷，人造原子没有天然原子干净完美，超导量子电路在量子相干时间、逻辑门准确度、频率稳定性等方面不如离子阱等。

量子计算的发展进程，大概可以对应量子力学中的叠加、纠缠、测量。其中最难以解决的就是测量，我们总希望人是量子计算机的唯一观察者。可实际上，环境无时无刻不在对量子系统进行测量。这种测量会导致量子计算机与环境产生纠缠，不再保持理想的量子纯态，逐渐失去量子相干性。任何量子系统都无法避免退相干，而目前的好的解决办法就是量子纠错。把量子比特信息分散存储在几个高度纠缠的量子比特里，通过测量错误征状来查错纠错。经过量子纠错，逻辑量子比特的寿命会远超过物理量子比特的相干时间。这样才会有更大的实用空间。

立足物理学来看，大多数物理学家认为量子计算机最有价值的潜在应用并不是传统意义上的计算，而是量子仿真。自然界中原子、分子的微观过程遵守的都是量子力学，可由于量子纠缠的存在，再强大的经典计算机也不能对规模稍大的量子系统进行严格求解，而只能借助近似。然而，量子计算机就是一台自带量子纠缠的机器，最适合在编程之后模拟待研究的复杂量子系统，也就是用量子机器求解量子问题。等量子计算机的出现，凡是涉及大量微观粒子的研究，例如凝聚态物理、量子化学、分子生物学都将发生很深刻的变革；相应的应用学科，例如材料合成、药物研发等，也都会有很本质的改变。

参考文献

- 1.Laloe, Franck, Do We Really Understand Quantum Mechanics, Cambridge University Press, 2012, ISBN 978-1-107-02501-1
- 2.Zurek, Wojciech, Decoherence and the Transition from Quantum to Classical—Revisited, Los Alamos Science, 2002, 27
- 3.Schlosshauer, Maximilian. "Decoherence, the Measurement Problem, and Interpretations of Quantum Mechanics". Reviews of Modern Physics.
- 4.曾谨言. 量子力学教程：量子力学百年. 科学出版社.
- 5.Michael A. Nielsen; Isaac L. Chuang. Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition. Cambridge University Press. 9 December 2010. ISBN 978-1-139-49548-6.
- 6.Haroche, Serge; Raimond, Jean-Michel. Exploring the Quantum: Atoms, Cavities, and Photons 1st. Oxford University Press. 2006. ISBN 978-0198509141.
- 7.Shor, Peter W. (1997) , "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer", SIAM J. Comput. 26 (5): 1484–1509
- 8.V. Scarani, N.J. Cerf, M. Dusek, N. Lütkenhaus, and M. Peev, “The security of practical quantum key distribution”, Rev. Mod. Phys. 81, 1301-1350 (2009)
- 9.Jian-Wei Pan, Zeng-Bing Chen, Chao-Yang Lu, Harald Weinfurter, Anton Zeilinger and Marek Zukowski Rev. Mod. Phys. 84, 777 (2012)
- 10.Yung, M.-H., Benjamin, S. & Bose, S. Processor Core Model for Quantum Computing. Phys. Rev. Lett. 96, 220501 (2006)
- 11.Zhang*, J., Yung*, M.-H., Laflamme, R., Aspuru-Guzik, A. & Baugh, J. Digital quantum simulation of the statistical mechanics of a frustrated magnet. Nat. Commun. 3, 880 (2012)