



中国科协学会学术部 编

新

观点新学说学术沙龙文集

63

量子信息技术前沿研究



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

新观点新学说学术沙龙文集⑥③

量子信息技术前沿研究

中国科协学会学术部 编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

量子信息技术前沿研究 / 中国科协学会学术部编. —北京: 中国科学技术出版社, 2014. 3

ISBN 978 - 7 - 5046 - 6562 - 1

I. ①量… II. ①中… III. ①量子力学 - 信息技术 - 研究
IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 037397 号

选题策划 赵 晖

责任编辑 赵 晖

责任校对 赵丽英

责任印制 张建英



出版 中国科学技术出版社

发行 科学普及出版社

地址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮编 100081

发行电话 010 - 62173865

传真 010 - 62179148

投稿电话 010 - 62103182

网址 <http://www.esppbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16

字 数 150 千字

印 张 8.75

印 数 1 - 2000 册

版 次 2014 年 3 月第 1 版

印 次 2014 年 3 月第 1 次印刷

印 刷 北京长宁印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6562 - 1/O · 174

定 价 18.00 元

凡购买本社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

倡导自由探究

鼓励学术争鸣

活跃学术氛围

促进原始创新

序

2012年9月20—21日,在北京举办了中国科协第63期新观点新学说学术沙龙,本期沙龙的主题是“量子信息技术前沿研究”。

近年来,在理论和实验研究方面量子信息技术都已经取得了重要突破。它作为高精尖科技在全球范围内已成为当今科研领域的重点课题。我国在量子技术领域也取得了很大的进步,特别是在量子通信方面,目前的进展已居于国际先进水平。1980年我在爱丁堡大学读博士期间,对两个学术研讨会印象深刻:一个是克隆羊,另一个就是量子计算机。16年后克隆羊的研究成功了,量子计算和量子计算机到现在也已成为全球学者都关心的一个热门话题。

为了进一步推动量子信息技术的前沿研究,组织了本次沙龙,效果很好,在座专家都一致认为这样的沙龙非常有必要定期组织。本期沙龙得到了中国科协的支持和资助,由中国电子学会承办。沙龙邀请了22位量子信息技术相关领域资深专家参加发言和讨论,10位博士研究生列席了沙龙。

沙龙举办得非常成功,紧紧围绕量子信息技术中的关键科学与技术问题、量子物理与信息科学与技术交叉学科研究热点、量子信息技术应用领域及实用化过程中的若干问题等几大中心议题展开讨论和交流。大家各抒己见、畅所欲言,讨论热烈、深入,提出了许多新见解、新观点、新思路。通过交流、讨论,大家普遍认为,量子信息技术作为量子理论和信息科学交叉结合的产物,为物理、信息学科的融合和发展开创了新的思路,具有广阔的应用前景。希望通过本次高层次的沙龙进一步推动我国量子信息技术的创新和发展。

李 杰

2012年9月底

目 录

绝热量子计算	吴 楠 宋方敏 (2)
快速构建量子稳定子码的最小网格图	肖芳英 陈汉武 (19)
量子计算与量子计算机	吴 楠 宋方敏 (35)
量子信息技术	郭 弘 (63)
量子信息科学中的量子控制	李新奇 (69)
原子光频标	高克林 (72)
量子计算	郭国平 (81)
量子——原子光学与量子精密测量技术	张卫平 (86)
非线性微纳集成光子器件及其量子信息应用	郑 铮 (88)
凝聚态模型在量子计算里面的应用及相关实验	范 桁 (92)
量子密码	韩正甫 (103)
激光冷却原子、分子的科学和技术	刘伍明 (107)
量子直接安全通信 (QSDC)	龙桂鲁 (111)
经典关联与量子关联	骆顺龙 (114)
专家简介	(122)
部分媒体报道	(131)



会议时间

2012 年 9 月 20—21 日

会议地点

北京西郊宾馆一号楼二层第二会议室

主持人

2012 年 9 月 20 日上午 李卫国

下午 章正宇

9 月 21 日上午 骆顺龙



绝热量子计算

◎ 吴楠 宋方敏

1 引言

自从 1982 年量子计算的概念被提出以来,量子计算理论的迅速发展引起了物理学家、数学家和计算机科学家广泛的兴趣^[1]。量子计算机配合合适的量子算法可以将经典计算机中某些 NP 问题指数级加速^[2],这无疑具有巨大的理论和实际意义。对量子计算模型的进一步研究发现,通用量子计算(universal quantum computation)具有超越普通确定性图灵计算的巨大潜力^[2]。随着几个代表性的有效量子算法的提出和被实验验证,量子计算已经成为计算机科学领域最前沿和最受关注的方向之一。

量子计算的数学框架是量子力学的四个公设^[3],据其提出的传统量子计算模型主要包括量子门电路模型(quantum gate circuit model)、量子图灵机模型(quantum turing machine model)和量子随机存储机模型(quantum random access machine model)等。传统的量子算法在时间演化(time evolution)部分由若干有序量子门组成,所以量子门电路模型更接近于传统量子算法的描述,且实现比较简单,因此量子门电路模型成为使用最广泛的量子计算模型^[4]。

从计算风范(computational paradigm)上讲,门电路量子计算属于典型的“数字式”量子计算^[5]。也就是说,在这种风范下,量子体系依靠量子门对量子态的作用进行演化,算法被描述为量子系统中一系列连续的酉演化(量子门),问题的输入数据被编码为该系统的初态(initial states),解则被编码为系统的终态(final states)。当量子计算开始后,在每个时间段 ΔT 中,系统服从薛定谔方程进行与相应酉门对应的时间演化;系统的状态由初态演化到终态后,用量子测量将被编码的结果读出。传统的 Grover 算法^[6]、Deutsch 算法^[2]、Shor 算法^[7]和



量子傅里叶变换(quantum fourier transform)^[8]都基于这种风范设计。从表面看来,门电路量子计算是一种很自然的计算方式,不论从形式还是算法上都接近于经典计算的结构化思想。但这种计算风范却使量子计算机的物理实现和量子算法的设计面临较大的困难,这种困难集中反映在近 10 年来没有新的真正意义上的量子算法的出现^[9],以及“数字式”量子计算机实验的进展缓慢。传统量子算法的设计主要考虑酉演化部分的各种量子门的组合,利用量子相干和/或量子纠缠将希望获得结果的量子变量之本征态的概率幅加强,从而高概率地获得期望结果;设计量子算法需要考虑到所有量子位的全局特性,以及量子计算的独特属性(如量子变量不可复制),因此量子算法具有与直觉不符或“反直觉(counterintuitive)”的特点,这导致设计新的量子算法是较困难的^[9]。绝热量子计算为计算机科学家、数学家或物理学家以一种全新的视角去寻找新的有效量子算法提供了可能。

绝热量子计算在结构上首先确定系统的初态和终态物理环境及其 Hamilton 量的物理表达,中间的过程由系统遵循薛定谔方程自由演化完成。根据绝热量子原理,只要设置合理的演化时间和终态,系统将自动以最小能量耗散完成绝热演化,根据几何量子计算的理论,这相当于大自然为我们设计了完整的计算路径^[10],我们只要将问题的输入和期望演化结果描述为系统的物理量,并操控量子系统 Hamilton 量的变化就可以了。

近 3 年来,一些研究机构为发展大规模绝热量子计算进行了较前沿的研究和实验,取得了一定的突破和令人关注的结果,而国内目前在绝热量子计算方面几乎还是空白。以下讨论尽量避开讨论复杂的物理背景,着重从计算机科学的角度阐述绝热量子理论和绝热量子计算。

2 绝热量子演化原理

绝热定理(adiabatic theorem)的提出可追溯到 1928 年, M. Born 和 V. Fock 提出了绝热定理^[11]:若一个物理系统的本征值与其他的 Hamilton 谱之间存在间隔(Gap),当该系统受到一个作用足够慢的扰动(perturbation)时,系统将保持其(受扰动前的)瞬时(instantaneous)本征态。

绝热定理同样适用于量子力学所定义的封闭物理系统。



量子力学的第二公设指出,封闭量子系统的时间演化状态可由薛定谔方程描述^[1]:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = H(t) |\psi(t)\rangle$$

其中, $\hbar$ 是普朗克常数,算符 H 为系统的 Hamilton 量。 H 可由一个其本征向量可表征系统本征态的 Hermit 矩阵描述。故存在一个对 H 的谱分解^[3]:

$$H = \sum_E E |E\rangle \langle E|$$

其特征值是 E , $|E\rangle$ 是相应的特征向量。状态 $|E\rangle$ 称为能量本征态 (energy eigenstate),故 E 为 $|E\rangle$ 的能量,最低的能量称为系统的基态能量 (ground state energy),对应的能量本征态 (或本征空间) 称为基态 (ground state)。薛定谔方程亦可由另一种形式描述,即写为如下由 Hamilton 量 $H(t)$ 定义的时间演化 U 的描述 (以下统一令 $\hbar=1$):

$$\frac{d}{dt} U(t) = -iH(t)U(t)$$

方程的初始条件为 $U(0)=I$,系统的 Hamilton 量由 $H(0)$ 演化为 $H(T)$ 导致了时间演化 $U(T)$ 的发生。 $U(T)$ 可以被容易地表示为 $U(T)=e^{-i\hat{H}T}$ 。量子物理和量子计算的一个核心任务就是找到系统随时间变化的 Hamilton 量的一个 (近似) 解。

量子绝热理论的思想是使一个封闭物理系统从初始基态开始,力求保持最低的演化能级 (以处于基态的方式),使其 Hamilton 量“足够慢”地演化到系统的终态。

形式化地讲,量子绝热理论指定了一个符合绝热演化条件的演化时间的下界,参数化了时间演化算符 $H(s)$ ($0 \leq s \leq 1$) 及其基态 $\varphi(s)$ 。绝热量子演化的目标是,当系统的 Hamilton 量由 $H(0)$ 演化为 $H(1)$ 时,系统的初态 $\psi(0)=\varphi(0)$ 也随之演化为近似的 $\psi(1) \approx \varphi(1)$ 即 $H(1)$ 的基态。为了描述系统演化的“速率”,引入迟滞因子 (Delay Factor) $\tau(s)$,这时薛定谔方程可写为如下形式:

$$\frac{d}{ds} |\psi(s)\rangle = -i\tau(s)H(s) |\psi(s)\rangle$$

上式中演化的决定量是 $H(s)$ 的两个最小本征值之间的间隔,称为谱间隔 (spec-



tral gap), 设为 $g(s)$ 。系统以如下的演化迟滞由 $\varphi(0)$ 演化到 $\varphi(1)$ 即被认为是“足够慢的”^[12]:

$$\tau(s) \gg \frac{\left\| \frac{d}{ds} H(s) \right\|_2}{g^2(s)}$$

这样, 演化过程的总迟滞为 $\int_{i=0}^1 \tau(s) ds$ 。由于确定大部分 Hamilton 量对于每个 s 的间隔 $g(s)$ 过于困难, 因此定义其最小间隔 $g_{\min} := \min_s g(s)$ 及最大间隔 $\Delta_{\max} := \max_s \left\| \frac{d}{ds} H(s) \right\|_2$ 。最终绝热量子演化可定义为包含迟滞因子 $\tau(s) = \tau_c$

$\in O\left(\frac{\Delta_{\max}}{g_{\min}^2}\right)$ 的量子演化过程^[12], 或可写为:

$$T = \Omega\left(\frac{\left\| \frac{d}{ds} H(s) \right\|_2}{\min_{s \in [0,1]} \{g^2(s)\}}\right)$$

3 绝热量子计算

利用绝热量子演化原理进行计算的过程称为绝热量子计算。它由美国麻省理工学院 Ed. Farhi, J. Goldstone, M. Sipser 和美国东北大学 S. Gutmann 等人^[11]提出, 其核心思想如下:

(1) 描述待求问题的连续 Hamilton 量过于复杂或难以模拟, 但其基态描述了解问题的解;

(2) 另一个具有简单 Hamilton 量的系统可被初始化为待求问题 Hamilton 量的基态;

(3) 具有简单 Hamilton 量的系统可以绝热演化到 1 中具备复杂 Hamilton 量的系统。

当上述三点满足时, 根据绝热量子演化原理, 系统将保持在基态进行绝热演化, 其演化的终态(基态)即描述了解问题的解。

详细分析, 绝热量子计算的过程如下。当时间 $t=0$ 时, 量子系统的状态由 Hamilton 量 H_0 描述, 其本征值容易计算得到。接下来, 系统以绝热的方式缓慢



地演化到终态,其 Hamilton 量是 H_f 。 H_f 的基态就是所求某特定极小化问题 f 的解^[12]。我们令希望极小化的函数对应的 H_f 之本征态的能量为 λ_z , 并设函数 f 的域为 $\{0,1\}^n$, 则终态的 Hamilton 量可写为:

$$H_f := \sum_{z \in \{0,1\}^n} f(z) |z\rangle \langle z|$$

根据量子力学公设和绝热量子计算理论,时间演化过程中的 Hamilton 量在演化时域内的任一时刻 t 的状态可写为其初态和终态的线性叠加^[13]: $H(t) := (1 - t/T)H_0 + (t/T)H_f$ (见图 1)。其中 $0 \leq t \leq T$, T 为 $H_0 \rightarrow H_f$ 演化过程的决定 (Crucial) 迟滞因子。易见,在该模型下,只要将 T 选择的足够大,系统初态的基态 $|\psi(0)\rangle = |0^{\otimes n}\rangle$ 将映射到函数 f 的全局极小值。这样,在演化开始后, $H(t)$ 根据绝热理论随着系统的演化缓慢地变化,并最终达到终态 $|\psi(T)\rangle$, 绝热演化的终态的基态接近于问题的解被编码的终态基态 $|\psi_g(T)\rangle$ (图 1 中当 $t/T = 1$ 时粗线对应的基态能量 $E_g(1)$ 所对应的态)。

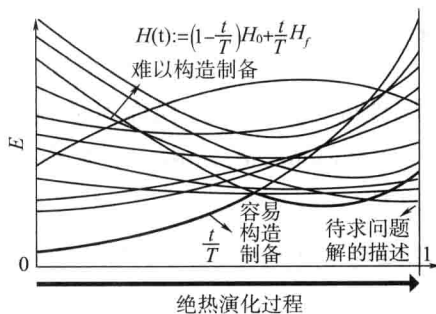


图 1 绝热量子演化轨迹(图中粗线)^[14]

4 绝热量子计算的计算能力

自意识到量子计算的功力有可能超越传统计算机以来,量子计算模型的计算能力一直是研究的重点。因此,绝热量子计算的计算能力是否与传统量子计算一致是一个重要的问题。传统的量子计算模型主要包括量子图灵机模型 (quantum turing machine model)^[2,15]、量子线路模型 (quantum circuit model)^[2]、



量子随机存储机模型(quantum random access machine)^[16]等,它们的计算能力已经被证明为等价^[1,2,15]。传统量子计算是一种用量子位作为量子信息载体,以一系列有序量子门(酉矩阵)的作用来完成量子演化的“数字式”计算方式;与传统量子计算相比,绝热量子计算是一种不依赖量子门而依赖于自由时间演化和量子绝热理论的“模拟式”计算模式,它们不论在对问题的建模、求解和解的读出方面都存在明显的差异。因此,两者的计算能力是否存在差异一直备受关注。

2004年,美国加州大学 Berkeley 分校的 D. Aharonov 等人^[17]发表了一套理论,可将任意传统量子算法在多项式时间内进行绝热模拟,这表明,绝热量子计算模型和传统的量子线路模型存在多项式规模的等价(polynomially equivalent)。

Aharonov 等首先建立了一个特定条件下的标准映射,可将任意 Hermit 矩阵映射为 Markov 链(即随机矩阵, stochastic matrices),而后建立该 Markov 链的谱间隔模型并给出其本征值间隔的下限(传播界限, conductance bound)。在上述基础上,根据绝热量子理论给出了在局域 Hamilton 量中包含 5-量子位相互作用时,绝热量子计算可多项式时间内转换为标准通用量子计算的证明,即证明了该条件下绝热量子计算的通用性;然后利用几何约束将 5-量子位相互作用约减为 3-量子位相互作用并证明上述性质同样存在。

定理 1^[17] 局域 Hamilton 量中包含三个量子位相互作用的绝热量子计算模型与标准量子计算模型多项式规模等价。

推论 1^[17] 具有稀疏 Hamilton 量(sparse hamiltonians)的绝热量子计算模型多项式规模等价于标准量子计算模型。

最后,通过引入二维格(2-D Lattice)模型,证明了临近 2 量子位相互作用在局域 Hamilton 量中均可多项式时间内转化为标准通用量子计算模型。

定理 2^[17] 在 2-维网格(2-D Grid)六相粒子集(6-state particles/6-dimensional particles set)上具有 2-体(two-body/two-qubit)最邻近 Hamilton 量操作的绝热量子计算模型与标准量子计算模型多项式规模等价。

这样,根据量子计算的第四(复合系统)公设,在任意封闭量子系统中,绝热量子计算模型的计算能力与标准量子计算模型(量子线路模型、量子图灵机模型、量子随机存储及模型)等价。



绝热量子计算的计算能力的给出具有里程碑式的意义,这表明将有可能利用绝热量子计算来避免传统量子计算所面临的困难从而解决某些 NP 问题。

5 绝热量子计算与传统量子计算的对比

上述分析中可以看出,绝热量子计算与传统量子计算在处理 Hamilton 量上本质的区别:前者并不以显式的酉变换改变系统 Hamilton 量来控制量子计算的过程,而是设定绝热量子演化条件,让系统在物理定律的支配下自行进行时间演化。这种方式避免了门电路量子计算模型下书写量子算法和物理实现等目前难以克服的困难。表 1 给出二者之间在模型和物理实现上的对比。

表 1 绝热量子计算与传统量子计算的对比

指标	绝热量子计算	传统量子计算	两者的对比
Hamilton 量的演化方式	系统连续绝热演化	量子态上串行作用酉矩阵	绝热量子计算中,传统量子算法的时域结构(time-domain structure)被翻译为量子绝热系统的结构化性质(structural properties),算法的执行不依赖于时域量子门操作,增强了体系的可操控性,并在很大程度上避免了退相干的影响 ^[18] ;传统量子计算的时域酉操作要求精确的时间控制,否则会引起结果的严重误差;复杂的串行酉操作作为退相干引入了额外的来源 ^[1]
待解问题的输入的描述	编码在系统的 Hamilton 量中	编码在系统的初态中	绝热量子计算的解存在于终态的基态中,基态相对于终态本身具有更强的抗干扰性(robustness),并更易抵御退相干的影响;传统量子计算的问题和解被独立地编码,这要求在系统中必须具有组强的关联(或纠缠,如 Shor 算法),系统必须提供足够的相干时间和良好的环境以防止退相干 ^[1,2]



续表

指标	绝热量子计算	传统量子计算	两者的对比
问题的解的描述	编码在系统终态的基态中	编码在系统的终态中	
Hamilton 量操作方式	模拟(analog)方式 ^[13]	数字(digital)方式	绝热量子计算在 Hamilton 量操作上要求较低,因为系统的演化方式精确服从薛定谔方程,无须加入强量子位纠错机制,仅需保证系统按照绝热方式演化即可 ^[18] ;经典量子计算的每一步都产生一个“数字式”结果,并保存在数个量子位中,为了保证每一步演化结果符合预期,必须加入严格的量子纠错机制(量子纠错码或者量子容错体系结构),并提供纠错所需的额外相干时间
物理实现	易用宏观量子系统实现 ^[19]	一般用微观量子系统实现	绝热量子计算不需要过多额外的容错、纠错开销,且对体系内相干性要求较弱,因此用宏观(如超导量子线路)量子系统实现比较简单,宏观量子计算具有很多优点,如耦合性强,可控性强,易扩展等 ^[19] ;传统量子计算中量子位的载体侧重于微观量子效应,用传统宏观方法难以测量,对于微观量子效应,一是采用以液相 NMR 为代表的系综方式实现,但量子位系综的引入很大程度上削减了相干时间,增加了退相干效应的影响;二是引入更强的量子位约束方式(如离子阱)及更灵敏的观测设备,这增加了量子系统与环境耦合的概率并增加了控制的难度 ^[1]

6 绝热量子计算与传统量子计算物理实现的对比

绝热量子计算与传统量子计算已经在计算能力上证明为等价,对其各自性



质的研究可相互借鉴,而量子计算研究的另一个重要目的是制造量子计算机,也就是将不同的量子计算模型用物理设备实现并用于复杂问题的求解。量子计算与经典计算不同,就目前技术水平看来,其物理实现的复杂性很大程度决定其求解问题的效果。因此,许多工作致力于寻找一种物理实现相对简单、可靠性强而又具备较强可扩展性的通用计算模型。本节拟通过绝热量子计算与传统量子计算物理实现的对比来说明在目前技术条件下绝热量子计算模型在建造可靠、可扩展通用量子计算机上的优越性。

6.1 传统量子计算的物理实现

基于量子门的量子计算的物理实现的研究持续了近 10 年时间,已经取得了一定的成果。其中最具代表性的是 2001 年 IBM Almaden 研究中心利用液相核磁共振(liquid NMR)操控小分子上的原子自旋状态实现小规模系综量子算法的实验^[20]。研究人员用核磁共振仪的射频脉冲控制 7 个耦合的量子位实现了 Shor 算法分解整数 15 的实验。这个结果引起了广泛地关注,被认为是规模化量子计算的起点^[1]。

然而在此之后的几年中,没有公开报道更好的结果(包括算法中更多的可用量子位和更长的相干时间),这可能意味着传统量子计算机的物理实现遇到了困难。尽管传统量子计算机的物理实现途径已发展出近 10 种,但要进行可靠的量子计算,都必须兼顾两个标准:一是必须使体系内所有的量子位相互耦合,以实现外部可控性;二是必须具备一定的相干时间,其与单位量子门操作时间的比值一般应大于 10^5 ^[18]。

遗憾的是,这两个标准本身就是一对矛盾,量子位之间的耦合越强,其相干时间就越短;相反,要增加体系的相干时间,必须松弛对量子位的控制力(见图 2)。

更重要的是,量子计算的计算能力与体系中可用的量子位数目指数级相关,故量子计算机的可扩展性尤为重要。然而,向传统量子计算体系中增加量子位会减弱体系内的耦合性并缩短相干时间。这种现象目前尚未找到有效的解决方法,对传统量子计算机的研制是一个重大的阻碍。在实现方面,传统量子计算依赖酉变换序列,各量子门都依赖精确的时域操作,这增加了设计的复

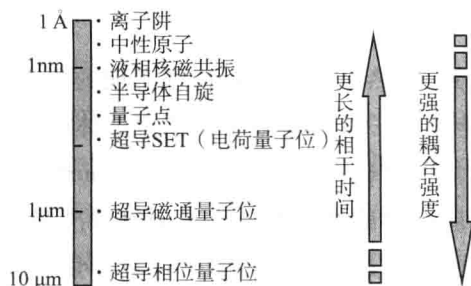


图2 传统门电路量子计算机所面临的矛盾

杂度,并为退相干引入了额外的来源;传统量子计算中的输入数据和解都被独立编码在不同的量子位中,要求系统具有很强的态纠缠能力,这就要求系统具有相当长的相干时间;传统量子计算采用数字编码来保存每一步计算的结果,但由于目前设备的可靠性尚低(根据不同的实现途径误差在5%~20%,见图3),需要设计量子纠错系统,这进一步增加了冗余的量子位和额外的相干时间需求。

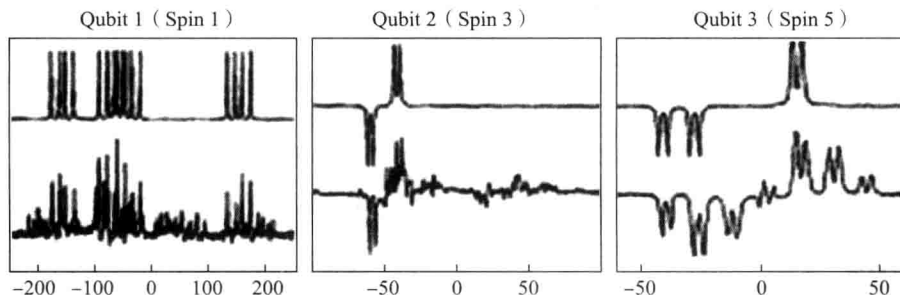


图3 传统量子计算物理实现(NMR量子计算)中退相干所带来的误差对结果的影响^[21]

(图中上半部分是理论谱线,下半部分为主要因退相干所产生的实际谱线)

综上所述,从短期看来,传统规模化量子计算的物理实现尚难解决上述困难,新发展出的一些应对措施短期内亦难被验证。