



# 量子信息物理基础研究进展

段开敏, 李传锋\*

中国科学技术大学, 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026

\*联系人, E-mail: cfli@ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-07-05; 接受日期: 2012-08-01; 网络出版日期: 2012-09-12

国家自然科学基金(批准号: 60921091, 11274289)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2011CB921200)资助项目

**摘要** 量子力学与信息论的结合产生了量子信息科学, 近来量子信息领域的发展又反过来促进了量子物理的发展. 本文综述了近几年量子信息物理基础研究的一些进展, 包括: 量子关联的概念与应用, 纠缠辅助的熵的不确定关系和开放量子系统环境的控制及 Non-Markovian 性的定量研究进展.

**关键词** 量子关联, 熵的不确定关系, 环境控制

**PACS:** 03.67-a, 42.50.Xa, 03.65.Yz

**doi:** 10.1360/132012-607

量子信息科学是量子力学与信息科学相结合的产物<sup>[1]</sup>, 包括了量子保密通信、量子模拟与量子计算等分支. 用于量子信息研究的物理体系主要有线性光学、离子阱、光晶格、超导约瑟夫森结等. 近年来, 随着各物理体系相关技术突飞猛进, 量子信息领域的研究不断深入, 这反过来进一步推动了量子力学的发展, 丰富了量子物理的内涵, 加深了人们对量子世界的理解.

量子信息的起源可以追溯到爱因斯坦等人于 1935 年提出的质疑量子力学完备性的 EPR 佯谬<sup>[2]</sup>. 对于 EPR 佯谬的持续研究催生了量子纠缠<sup>[3]</sup>概念的产生, 而纠缠是量子信息过程的重要资源, 而基于量子纠缠的量子隐形传态等方案<sup>[4]</sup>可以说是量子信息兴起的标志之一. 近几年在 EPR 佯谬指明的方向上深入研究产生了不同分支的成果. 首先在对量子纠缠的研究中发现比纠缠还要基本的一个概念, 即量

子关联<sup>[5,6]</sup>, 而在对 EPR 佯谬本身的研究中则发现了新形式的基于熵的不确定关系<sup>[7]</sup>.

消相干是破坏量子信息过程优越性的最大障碍, 如何克服消相干一直是量子信息领域的核心问题之一. 而消相干过程实质上可以看做开放系统环境的影响, 近年来对于开放系统在环境中演化的 Non-Markovian 性已经开始定量化<sup>[8]</sup>, 而且开始发展对环境的调控技术. 本文主要从量子关联, 基于熵的不确定关系, 量子开放系统环境的控制等角度出发阐述量子信息研究进展反过来推动量子物理学研究的情况.

## 1 量子关联

量子纠缠是不同量子体系之间的一种特殊关联. 近年来随着量子信息理论的发展, 很多工作已经指

**引用格式:** 段开敏, 李传锋. 量子信息物理基础研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1176-1184

Duan K M, Li C F. Research progress in physics foundation for quantum information (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 1176-1184, doi: 10.1360/132012-607

出包含经典和量子两部分的关联可能比纠缠更广泛,更基础. 纠缠只是作为一种特殊的量子关联存在. 更进一步地,人们已经发现可分态中可能含有非经典关联,这就意味着纠缠为0的可分态中可能含有非0的量子关联<sup>[5,6]</sup>. 而且这种非纠缠的量子关联已经在理论上被用来在非幺正的量子计算模型中实现加速解决一些计算方案<sup>[9]</sup>,并已经在实验上得到实现<sup>[10]</sup>.

与纠缠一样,量子系统中的各种关联在周围环境噪声作用下都会不断衰减. 研究各种关联在不同噪声信道下的动力学过程将有助于我们进一步理解和应用它们. 而且相对于纠缠突然死亡的独特性质,对其他各种关联独特演化方式的研究不仅有助于区分各种关联在量子信息方案优越性方面的作用,对进一步利用它们也有着重要的实际意义.

关联是自然界中普遍存在的现象. 我们对一个系统进行观测的结果一般与我们先前对这个系统的观测和认识有关<sup>[11]</sup>. 在经典领域,关联可以很好地在 Shannon 信息理论框架内进行刻画<sup>[12]</sup>.

我们可以很自然地将互信息量的概念推广到量子系统,这样就能够得到量子互信息量的概念. 考虑一个两体的量子态 $\rho_{AB}$ ,量子互信息量定义为 $I(\rho_{AB})=S(\rho_A)+S(\rho_B)-S(\rho_{AB})$ ,其中 $S(\rho)=-\text{tr}\rho\log\rho$ 为冯·诺依曼熵, $\rho_A$ 和 $\rho_B$ 分别为 $\rho_{AB}$ 的约化密度矩阵. 受 Landauer 信息擦除原理的启发, Groisman 等人<sup>[13]</sup>利用一个关联的可操作性定义证明两体量子系统的总关联为其量子互信息量.

对这种经典互信息量表达形式的量子推广,我们需要引入一套完备的测量基底 $\{\Pi_j\}$ (不一定是正交基底)来对 B 体系进行测量,对于每次的测量结果 $j$ ,其概率为 $p_j = \text{tr}_{AB}(\rho_{AB}\Pi_j)$ . A 的态将塌缩到 $\rho_A^j = \text{tr}_B(\Pi_j\rho_{AB}\Pi_j)/p_j$ . 在对所有的测量基进行优化,量子体系的经典关联就定义为 $C(\rho_{AB})=S(\rho_A)-\min_{\{\Pi_j\}}\sum_j p_j S(\rho_A^j)$ <sup>[5]</sup>.

由于对两个量子关联在一起的体系的其中一个进行测量,将不可避免地导致对另一个体系的扰动,因此经典互信息量两种等价的表达形式在量子世界中一般是不一致的,它们之间的差值 $Q(\rho_{AB})=I(\rho_{AB})-C(\rho_{AB})$ 就是著名的量子失协(Quantum Discord)<sup>[6]</sup>. 可分态中也可能含有非0的量子失协,量子失协包含量子体系中的量子纠缠和非纠缠的量子

关联,它度量了量子体系中总的非经典关联,量子失协一经提出立刻引起了广泛的关注. 人们已经证明几乎所有的量子态都含有量子失协<sup>[14]</sup>,并研究不同物理体系中量子失协的情况,包括自旋链<sup>[15-17]</sup>、原子系统<sup>[18]</sup>、光子系统<sup>[10,19,20]</sup>、量子点<sup>[21]</sup>以及 NMR 系统等<sup>[22]</sup>. 最近量子失协的概念还从分立体系推广到连续高斯态体系<sup>[23-25]</sup>.

量子失协(特别是非纠缠的量子关联)在量子信息处理过程中的利用也被广泛研究,包括 DQC1 的量子计算方案<sup>[9,10]</sup>, Grover 搜索算法等<sup>[26]</sup>,它将有助于澄清量子方案能超越经典的真正原因. 量子失协在一些基本的物理问题中也起到重要的作用,如麦克斯韦妖<sup>[27]</sup>,量子相变等<sup>[15-17]</sup>,人们甚至开始研究具有相对论效应的量子失协情况<sup>[28,29]</sup>. 量子失协在一些基本量子信息理论方面也有着重要的应用,比如它与正定映射演化<sup>[30,31]</sup>及量子态广播定理<sup>[32,33]</sup>之间的对应关系等等.

在量子失协的概念提出后,人们也开始从不同的角度考虑量子系统中各种关联的度量方法. 最近, Modi 等人<sup>[34]</sup>利用距离相对熵的方法对量子体系中的各种关联进行定义. 这样所有的关联都能放在同一个框架内进行考虑,并且可以直接推广到多体高维系统.

从原始量子失协的定义可以看出,这是一种单边测量的定义方式. 而这种定义方法在一般情况下并不是对称的,对 B 的测量和对 A 的测量将得到不同的量子失协. 利用两边同时测量来定义各种关联的方法也已经被提出. 在一个复合的两体系统中,经典关联可以表示为“最大的经典互信息量”,也就是通过对系统的两个子体系同时做局域测量并对测量基底进行优化<sup>[35,36]</sup>. 由于从热库中提取信息需要做功,一种热力学方法也被用来定义量子关联<sup>[37,38]</sup>. 特别的,将通过完全的局域操作和经典通讯操作所提取的信息与总信息之间的差值定义为量子信息差额,可以用它来度量量子关联<sup>[38]</sup>. 考虑到经典态在测量的过程中不会被扰动,通过定义测量导致的扰动也可以用来刻画经典和量子关联<sup>[39]</sup>.

考虑到量子系统与环境之间不可避免的相互作用,各种关联的演化规律引起了人们的高度关注. 很多工作集中于比较量子失协和量子纠缠在各种噪声环境下演化的异同之处,发现量子失协在 Markovian 环境下比纠缠更能抵抗消相干<sup>[40]</sup>. 最近人们还发现

经典关联和量子关联在 Markovian 噪声下一些特殊的演化规律, 比如关联的衰减率有突变的现象<sup>[41]</sup>, 量子关联在消相干环境下会保持不变, 并且出现从经典消相干到量子消相干的突然变化<sup>[42]</sup>, 以及量子关联突然消失但却没有流失到环境中的现象<sup>[43]</sup>. 很多工作也研究关联在 Non-Markovian 环境下的演化, 发现在有限的时间间隔内, 量子关联会间断性消失而纠缠却会完全消失<sup>[44,45]</sup>.

中国科学技术大学中国科学院量子信息重点实验室在光学系统中实验研究了量子关联的演化特性, 验证了关联的突变现象<sup>[19,20]</sup>. 光子比特可以很容易地进行单比特操作并可以很好地与环境相分离, 因此将光子偏振编码成信息载体的方法已经被用来实现很多量子信息过程<sup>[46]</sup>. 而利用光子偏振与频率模式在双折射环境中的相互耦合, 可以模拟消位相环境<sup>[47]</sup>. 我们让偏振纠缠的光子对通过单边可控的石英晶体(用来模拟 Markovian 极限的消位相信道)来研究不同关联的演化. 我们研究的量子态为贝尔对角态, 并利用前面量子互信息量的定义来度量总关联, 用优化单边测量的方法度量经典关联, 因此量子失协就度量量子关联<sup>[19]</sup>.

图 1 为我们的实验装置. 通过中心波长为 780 nm 脉宽为 130 fs 的钛宝石锁模激光倍频得到的紫外脉冲光被一个紫外偏振分束器(UV PBS)分成两路, 其中一路透射  $45^\circ$  的线偏振光( $1/\sqrt{2}(H+V)$ ), 另一路反射  $-45^\circ$  的线偏振光( $1/\sqrt{2}(H-V)$ ). 这两路的相对功率大小可以很容易地通过半波片(HWP1)来改变, 并且它们之间的时间差别约为 6 ns. 这两路光在一个分束镜上重新合在一起并且同时泵浦两块相同切割光轴相互垂直的 BBO 晶体, 以制备光子偏振纠缠态<sup>[48]</sup>. 在用石英晶体(CP)补偿 BBO 晶体中的双折射效应后, 短路程的光制备得到最大纠缠态  $|\Phi^+\rangle = 1/\sqrt{2}(HH+VV)$ , 而长路程的光制备得到  $|\Phi^-\rangle = 1/\sqrt{2}(HH-VV)$ . [后面还用到的两个贝尔态为  $|\Psi^\pm\rangle = 1/\sqrt{2}(HV \pm VH)$ ].

两个光轴设置在  $22.5^\circ$  的半波片(HWP2 和 HWP4)将  $H$  变成  $1/\sqrt{2}(H+V)$  将  $V$  变成  $1/\sqrt{2}(H-V)$ . 光轴设置在  $0^\circ$  的半波片(HWP3)在  $H$  和  $V$  上引入一个  $\pi$  位相. 由于探测器区分不出两个制备过程的时间信息<sup>[49,50]</sup>,

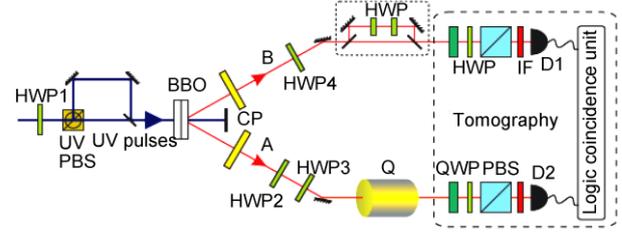


图 1 (网络版彩图)关联演化的实验装置<sup>[19]</sup>

Figure 1 (Color online) Setup of experiment on correlation dynamics [19].

因此所制备态变成  $\rho_{AB} = b|\Phi^-\rangle\langle\Phi^-| + d|\Psi^-\rangle\langle\Psi^-|$ , 这里  $b$  由两束泵浦光的相对强度决定, 并且  $b+d=1$ . 然后模式 A 上频率分布为  $f(\omega)$  的光子经过由厚度为  $L$  光轴设置在水平方向的石英片(Q)所模拟的消位相环境. 由于不同频率的光子在双折射环境中所获得的相对位相不一样, 在将频率信息抹除后, 光子偏振将出现消相干, 并且消相干系数为  $k = \int f(\omega) \exp(i\tau\omega) d\omega$ , 其中  $\tau = L\Delta n/c$ ,  $c$  为光子在真空中的速度,  $\Delta n$  为水平光子和垂直光子折射率的差值.

模式 B 中的虚线框是一个不等臂 Mach-Zehnder 装置, 它将光子再次分到长和短路径上以制备另一个输入态. 虚线框中的长路径有一个光轴放置在  $45^\circ$  上的半波片和一个光轴放置在水平方向的半波片. 这两个路径的时间差大于光子的相干长度而小于符合时间窗口(大约为 3 ns). 因此, 所制备的态变为

$$\rho = dR|\Phi^+\rangle\langle\Phi^+| + b(1-R)|\Phi^-\rangle\langle\Phi^-| + bR|\Psi^+\rangle\langle\Psi^+| + d(1-R)|\Psi^-\rangle\langle\Psi^-|,$$

其中  $R$  为虚线框中两个部分反射镜总的有效反射率. 模式 A 上的光子接着通过消位相信道. 我们利用量子态层析的方法来重构演化态<sup>[51]</sup>. 每个模式上的四分之一波片, 半波片和偏振分束镜用来设定所需要的 16 个测量基底. 最后用被装有半高全宽为 3 nm 的干涉滤波片的单光子探测器来探测两个光子并进行符合计数.

图 2 为  $\rho_{AB} = b|\Phi^-\rangle\langle\Phi^-| + d|\Psi^-\rangle\langle\Psi^-|$  ( $b=0.75$ ) 在消位相信道下的关联演化情况. 理论上, 应当对 B 模式上光子的投影基底  $|l\rangle = \cos\theta|0\rangle + \sin\theta e^{i\phi}|1\rangle$  通过搜索最佳的  $\theta$  和  $\phi$  进行优化, 以便得到模式 A 上的条件

熵  $S(\rho'_A)$ , 进而计算经典关联. 在实验中, 我们取  $\phi=0$  将  $\theta$  当成变量来测量  $S(\rho'_A)$  的值. 图 2(a) 为在不同石英片厚度下  $S(\rho'_A)$  的变化情况. 我们发现在  $L < 138\lambda_0$  时  $S(\rho'_A)$  的最小值在  $\theta=45^\circ$  的时候取得, 而  $L \geq 138\lambda_0$  时其最小值在  $\theta=0^\circ$  取得 ( $\lambda_0=0.78 \mu\text{m}$  为光子的中心波长). 这与理论预言(实线)相吻合<sup>[41]</sup>. 根据前面的定义这就意味着经典关联(C)的衰减率有一个突变现象. 图 2(b) 展现了总关联(I), 经典关联(C)和量子关联(Q)的演化情况. C(黑色方块)在  $L < 138\lambda_0$  时单调衰减而在  $L \geq 138\lambda_0$  时保持不变, 这与图 2(a) 相一致. 经典关联在消相干环境下保持不变的特性也可以用来做计算经典关联和量子关联的一种可操作性方法<sup>[41]</sup>.

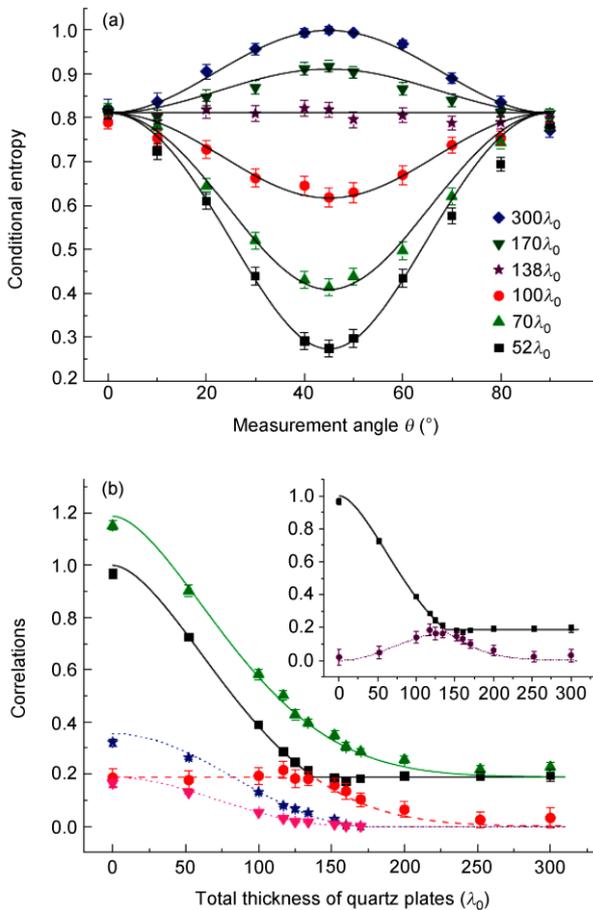


图 2 (网络版彩图)(a)不同石英片厚度时通过搜索测量角度确定经典关联的值; (b)展示演化过程中关联衰减率的突然变化<sup>[19]</sup>

Figure 2 (Color online) (a) Determining the value of classical correlation by searching the measurement angle for different thickness of quartz plates; (b) the sudden change of correlations during the evolution [19].

相反的,  $Q$ (红色圆点)以一种不同的方式演化, 它在  $L < 138\lambda_0$  时保持不变, 而在  $L \geq 138\lambda_0$  时单调衰减. 实验得到量子关联无消相干区域有着重要意义, 它可以用来实现抗消相干的量子信息处理方案. 这个现象随后在理论上被 Mazzola 等人<sup>[42]</sup>进一步进行阐述. 我们可以看到  $I$  (绿色上三角形)在演化过程中总是指数衰减, 这与量子互信息量连续变化的性质相一致. 绿色实线, 黑色实线以及红色虚线分别表示总关联, 经典关联和量子关联相应的理论预言. 误差主要来源于计数的统计起伏.

我们还考虑了量子纠缠的演化情况. 在这里, 我们分别用生成纠缠( $En$ )<sup>[52]</sup>和纠缠相对熵( $Rn$ )<sup>[53]</sup>来度量纠缠. 图 2(b)中蓝色星形表示  $En$  的实验结果而蓝色点划线为其相应的理论预言. 可以看到, 纠缠在  $L=173\lambda_0$  时被置为 0, 展现了纠缠突然死亡的现象<sup>[54]</sup>. 洋红色下三角形表示  $Rn$  的实验结果, 而洋红色点划线为其理论预言. 虽然在一开始的演化中  $En$  大于  $Rn$ , 它们在同一厚度出现突然死亡, 这验证了它们的自治性. 我们发现量子关联在演化过程中有时小于  $En$  而有时又大于  $En$ . 特别在  $L > 173\lambda_0$  时, 量子关联指数衰减而纠缠已经完全消失. 这验证了以前理论上关于量子失协比纠缠更能抵抗消相干的预言<sup>[40]</sup>. 由于  $Rn$  与其他关联一样都是以熵为计算基础, 它总是小于量子关联, 这也为我们的实验所证实. 图 2(b)中的插图进一步比较了非纠缠量子关联( $D=Q-Rn$ )<sup>[11]</sup>与经典关联的大小关系. 紫色圆点表示  $D$  的实验结果, 而紫色点划线表示相应的理论结果. 由于  $Q$  在衰减率上有突变现象,  $D$  的衰减率也有突变现象并且我们发现  $D < C$ .

## 2 基于熵的不确定关系

经典的海森堡不确定原理认为, 在一个量子力学系统中, 一个粒子的两个不对易的力学量(比如位置和动量)不可被同时确定. 精确地确定其中一个力学量的同时, 必定不能精确地确定另外一个力学量. 最原始的不确定关系的表达式  $\Delta R \Delta S \geq \hbar/2$  由海森堡提出<sup>[55]</sup>, 由 Kennard<sup>[56]</sup>证明. 此表达式只对特殊情况下成立. 一般情况下的不确定关系表达式  $\Delta R \Delta S \geq 1/2 \left| \langle [R, S] \rangle \right|$  由 Robertson<sup>[57]</sup>给出. 但是这个结果的右边的下限是态依赖的, 所以近 30 多年来 Bialynicki-

Birula 等人<sup>[58]</sup>又发展了基于熵的不确定关系, 这类不确定关系的特点是下限不再依赖于具体的态. Einstein 等人 1935 年提出的 EPR 佯谬认为: 如果  $AB$  两个粒子是孪生的, 可以同时准确测量  $A$  的位置和  $B$  的动量, 而从  $B$  的动量又可以推出  $A$  的动量, 等价于说可以同时确定  $A$  粒子的位置和动量. Einstein 等人<sup>[2]</sup>以此来质疑量子力学的完备性.

最近 Berta 等人<sup>[7]</sup>的理论研究进一步给出了这一问题的定量描述, 在观测者拥有被测粒子“量子信息”的情况下, 被测粒子测量结果的不确定度, 依赖于被测粒子与观测者所拥有的另一个粒子(存储量子信息)的纠缠度的大小. 当它们处于最大纠缠态时, 两个不对易的力学量可以同时被准确测量, 此时经典的海森堡不确定原理将不再成立. 此理论被称为新形式的海森堡不确定原理. 具体表达式为  $H(R|B) +$

$H(S|B) \geq \log_2 \frac{1}{c} + H(A|B)$ , 其中  $H(R|B)$  和  $H(S|B)$  是条件冯·诺依曼熵, 代表在  $B$  所存储的信息的辅助下, 分别测量  $R$  和  $S$  所得到结果的不确定度.  $H(A|B)$  是  $A$  和  $B$  之间的条件冯·诺依曼熵.  $c$  是  $R$  和  $S$  的本征态的重叠量.

量子信息重点实验室最近首次在光学系统中验证了新形式的海森堡不确定原理<sup>[59]</sup>. 实验装置如图 3, 我们还是利用非线性过程产生的孪生光子对制备出贝尔对角态  $\rho = x|\Phi^+\rangle\langle\Phi^+| + (1-x)|\Psi^-\rangle\langle\Psi^-|$ , 把其中一个光子作为被测光子, 另一个光子作为存储被测光子量子信息的辅助粒子. 本实验中的一个重

要元件是我们自己研制的自旋回声式量子存储器, 它由两段相同长度(每根长 120 m)的保偏光纤和光纤之间的一个半波片组成, 每根保偏光纤会引起极强的相位消相干, 但是通过中间的半波片把光的 H/V 偏振互换一下后, 第二根保偏光纤的相位消相干刚好抵消第一根的效应, 光子在此装置中可以存储 1.2  $\mu\text{s}$ , 保真度达到 98.3%. 通过将辅助光子存储在此量子存储器中, 我们实现了对被测光子的两个不对易力学量泡利算符  $R=\sigma_x$  和  $S=\sigma_z$  的测量, 并给出了这两个力学量输出结果不确定度的下界.

主要实验结果如图 4 所示, 横坐标是贝尔对角态中某一贝尔态的含量, 纵坐标是熵, 红线和蓝线分别为新形式不确定关系不等式的左边  $H(R|B)+H(S|B)$  和右边  $\log_2 \frac{1}{c} + H(A|B)$  这一结果确实违背了经典的不确定原理, 并且验证了新形式的海森堡不确定原理. 本成果将有助于人们更深刻地理解量子力学的本质特征, 同时对量子密钥传输的安全性证明也有着重要意义<sup>[60]</sup>, 并有望在量子工程中获得重要应用.

新形式的海森堡不确定关系引起了研究者的广泛兴趣, 在同期刊发表的文章中, Prevedel 等人<sup>[61]</sup>利用单模光纤作为存储器也实现了新形式的海森堡不确定关系的实验验证.

### 3 开放量子系统环境的调控

开放系统的研究源远流长<sup>[62]</sup>, 历久弥新. 早在

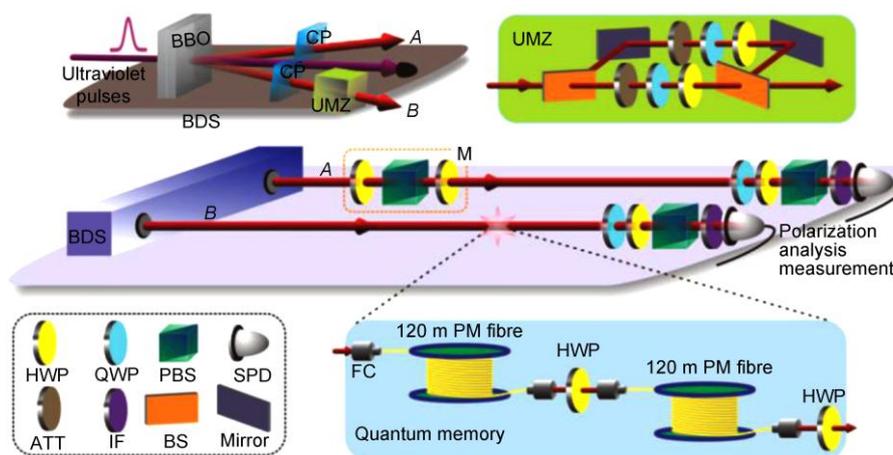


图 3 (网络版彩图)基于熵的不确定关系实验装置图<sup>[59]</sup>  
 Figure 3 (Color online) Setup of experiment on entropic uncertainty principle<sup>[59]</sup>.

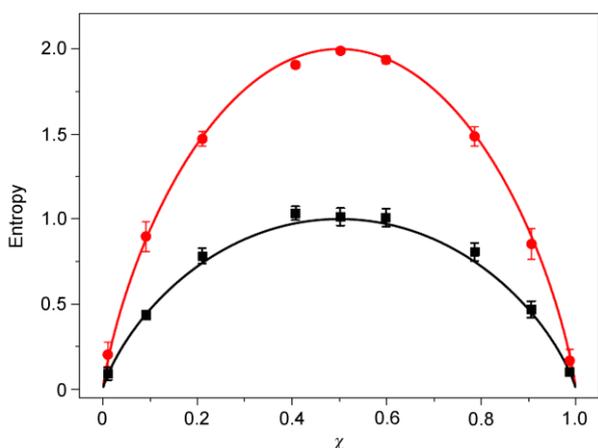


图4 (网络版彩图)基于熵的不确定关系实验结果<sup>[59]</sup>

Figure 4 (Color online) Results show entropic uncertainty principle [59].

一百多年前,俄国数学家 Markovian 就开始了无记忆性随机过程的研究. 在这类过程中,系统的信息单向地流入环境中,就像小河里的水流入大海中一样,一去不复返,这就是所谓的开放系统的 Markovian 过程. 但是随着实验技术的不断提高,人们在越来越多的体系中发现<sup>[63-69]</sup>,有些情况下系统流入环境中的信息可以部分甚至全部地流回到系统中,就像在涨潮的时候流入大海里的河水有可能会暂时地回流到河中一样. 这类过程被称为 Non-Markovian 过程.

一般情况下,处理开放系统时会用 Markovian 近似,即对感兴趣的系统来说,环境的记忆可以忽略不计. 系统将来的演化只与现在有关,与过去无关. 利用 Lindblad 方程求解<sup>[70]</sup>. 对于不能用 Markovian 近似的过程只能定性地说是 Non-Markovian 过程. 但是最近几年,科学家们提出了几种 Non-Markovian 性的定义<sup>[81]</sup>,使得 Non-Markovian 过程的定量研究成为可能.

具有 Markovian 特性的环境会不可避免地破坏量子系统的量子相干性,这就是所谓的消相干效应,它是实现量子计算和其他量子信息功能的主要障碍. 这种情况下量子信息单向地流失到环境中去,而环境回馈给系统的都是噪声. 但如果环境是非马尔科夫性的,那么它就能将量子信息返还回量子系统,这样的环境可以用来构造量子信息存储器. 然而,由于环境具有复杂的自由度,人们很难实现对环境的调控,使之从 Markovian 环境变成为 Non-Markovian 环境.

量子信息重点实验室组首次实现了对开放量子系统环境的这种调控<sup>[71]</sup>. 实验装置如图 5 所示. 我们利用非线性晶体的自发参量下转换过程制备出高纯度纠缠光子对,并将其中一个光子的偏振比特作为量子系统,其频率(或者说波长)作为环境,然后通过石英片的双折射效应把量子系统与环境耦合起来,实现量子系统在环境中的演化. 我们在光路中加入特制的法布里-波罗腔,通过改变法布里-波罗腔的转动角度,利用另外一个光子辅助探测,观察到开放系统的动力学演化在 Markovian 过程和 Non-Markovian 过程之间的突变现象.

本实验的关键在于引入特制的法布里-波罗腔来实现对开放量子系统(偏振比特)的环境(频率)的调控. 工作原理如图 6 所示,法布里-波罗腔所在光路中的干涉滤波片的带宽约为 4 nm,当转动法布里-波罗腔到一定角度的时候,比如 6°左右,则带宽范围内只有一个透过峰,可以看做是白噪声,则对应的环境为 Markovian 环境. 当转动法布里-波罗腔到另外的角度,如 9°或者 1.5°左右时,带宽范围内有两个透过峰,这时开放系统的演化就存在拍的现象,这时的环境为 Non-Markovian 环境.

实验的主要结果如图 7 所示,横坐标为法布里-波罗腔的转动角度,纵坐标为 Non-Markovian 性的定量度量. 当法布里-波罗腔转动到某个角度(约 4.1°),环境的 Markovian 性突然消失,变成 Non-Markovian 环境,而当继续转动到另一个角度时(约 8°),环境的

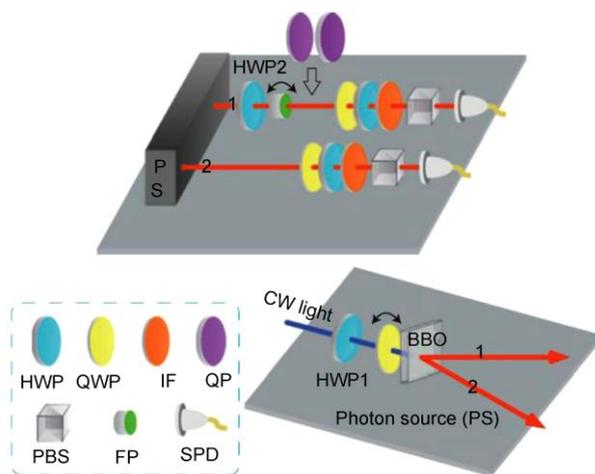


图5 (网络版彩图)环境调控与开放系统动力学演化实验装置图<sup>[71]</sup>

Figure 5 (Color online) Setup of experiment on environmental control and dynamics of open system [71].

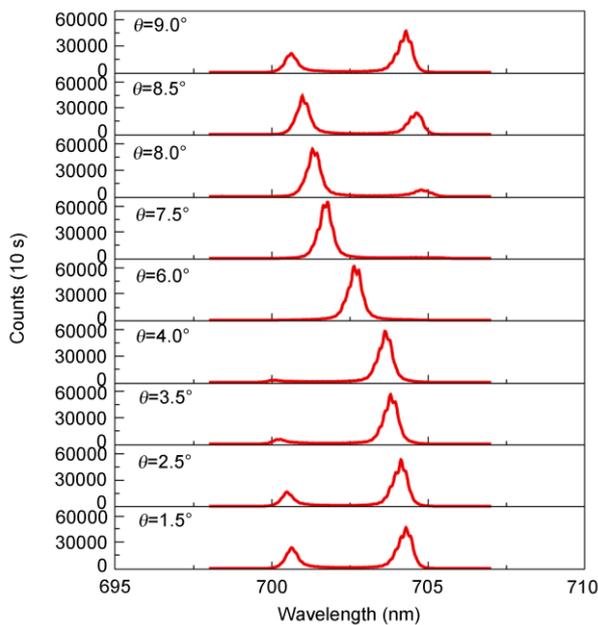


图 6 (网络版彩图)法布里-波罗腔透过率分布随偏转角度变化图<sup>[65]</sup>

Figure 6 (Color online) Transmission versus tilt angle of FP cavity [65].

Non-Markovian 性又突然消失, 变成 Markovian 环境, 从而实现了对环境(光子频率)的调控<sup>[72]</sup>.

本文中, 我们综述了近几年来量子信息物理基础研究的一些进展, 主要包括: 量子关联的概念与应

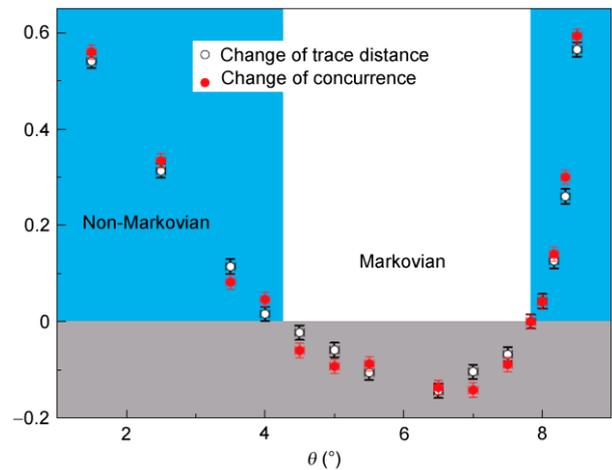


图 7 (网络版彩图)通过环境调控改变开放系统动力学演化特性实验结果<sup>[65]</sup>

Figure 7 (Color online) The dynamics property of open system under environmental control [65].

用, 纠缠辅助的熵的不确定关系和开放量子系统环境的控制及 Non-Markovian 性的定量研究进展. 通过以上几个事例我们可以看出, 量子信息研究的深入发展已经能够反过来推动量子力学本身的发展与完善, 使得人们对很多物理问题的认识比以前更深刻了. 我们相信这种趋势会越来越明显, 因为人类科学的发展就是这样螺旋式上升的.

## 参考文献

- 1 Bennett C H, DiVincenzo D P. Quantum information and computation. *Nature*, 2000, 404(6775): 247–255
- 2 Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys Rev*, 1935, 47: 777–780
- 3 Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, et al. Quantum entanglement. *Rev Mod Phys*, 2009, 81(2): 865–942
- 4 Bennett C H, Brassard G, Crépeau C, et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys Rev Lett*, 1993, 70: 1895–1899
- 5 Henderson L, Vedral V. Classical, quantum and total correlations. *J Phys A-Math Gen*, 2001, 34(35): 6899–6905
- 6 Ollivier H, Zurek W H. Quantum discord: A measure of the quantumness of correlations. *Phys Rev Lett*, 2001, 88(1): 017901
- 7 Berta M, Christandl M, Colbeck R, et al. The uncertainty principle in the presence of quantum memory. *Nat Phys*, 2010, 6: 659–662; Renes J M, Boileau J C. Conjectured strong complementary information tradeoff. *Phys Rev Lett*, 2005, 103: 020402
- 8 Wolf M M, Eisert J, Cubitt T S, et al. Assessing non-Markovian quantum dynamics. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 150402; Rivas Á, Huelga S F, Plenio M B. Entanglement and non-Markovianity of quantum evolutions. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 050403; Breuer H P, Laine E M, Piilo J. Measure for the degree of non-Markovian behavior of quantum processes in open systems. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 210401
- 9 Datta A, Shaji A, Caves C M. Quantum discord and the power of one qubit. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 050502
- 10 Lanyon B P, Barbieri M, Almeida M P, et al. Experimental quantum computing without entanglement. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 200501
- 11 Vedral V. The elusive source of speedup. *Found Phys*, 2010, 40: 1141–1154
- 12 Shannon C E. A mathematical theory of communication. *Bell Syst Tech J*, 1948, 27: 379–423: 623–656
- 13 Groisman B, Popescu S, Winter A. Quantum, classical, and total amount of correlations in a quantum state. *Phys Rev A*, 2005, 72: 032317
- 14 Ferraro A, Aolita L, Cavalanti D, et al. Almost all quantum states have nonclassical correlations. *Phys Rev A*, 2010, 81: 052318

- 15 Sarandy M S. Classical correlation and quantum discord in critical systems. *Phys Rev A*, 2009, 80: 022108
- 16 Werlang T, Rigolin G. Thermal and magnetic quantum discord in Heisenberg models. *Phys Rev A*, 2010, 81: 044101
- 17 Chen Y X, Li S W. Quantum correlations in topological quantum phase transitions. *Phys Rev A*, 2010, 81: 032120
- 18 Cole J H. Understanding entanglement sudden death through multipartite entanglement and quantum correlations. *J Phys A-Math Theor*, 2010, 43: 135301
- 19 Xu J S, Xu X Y, Li C F, et al. Experimental investigation of classical and quantum correlations under decoherence. *Nat Commun*, 2010, 1: 7
- 20 Xu J S, Li C F, Zhang C J, et al. Experimental investigation of the non-Markovian dynamics of classical and quantum correlations. *Phys Rev A*, 2010, 82: 042328
- 21 Fanchini F F, Castelano L K, Caldeira A O. Entanglement versus quantum discord in two coupled double quantum dots. *New J Phys*, 2010, 12: 073009
- 22 Soares-Pinto D O, Celeri L C, Auccaise R, et al. Nonclassical correlation in NMR quadrupolar systems. *Phys Rev A*, 2010, 81: 062118
- 23 Giorda P, Paris M G A. Gaussian quantum discord. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 020503
- 24 Vasile R, Giorda P, Olivares S, et al. Nonclassical correlations in non-Markovian continuous-variable systems. *Phys Rev A*, 2010, 82: 012313
- 25 Adesso G, Datta A. Quantum versus classical correlations in gaussian states. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 030501
- 26 Cui J, Fan H. Correlations in the Grover search. *J Phys A-Math Theor*, 2010, 43: 045305
- 27 Zurek W H. Quantum discord and Maxwell's demons. *Phys Rev A*, 2003, 67 (1): 012320
- 28 Datta A. Quantum discord between relatively accelerated observers. *Phys Rev A*, 2009, 80: 052304
- 29 Wang J C, Deng J F, Jing J L. Classical correlation and quantum discord sharing of Dirac fields in noninertial frames. *Phys Rev A*, 2010, 81(5): 052120
- 30 Rodriguez-Rosario C A, Modi K, Kuah A, et al. Completely positive maps and classical correlations. *J Phys A-Math Theor*, 2008, 41(20): 205301
- 31 Shabani A, Lidar D A. Vanishing quantum discord is necessary and sufficient for completely positive maps. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(10): 100402
- 32 Piani M, Christandl M, Mora C E, et al. Broadcast copies reveal the quantumness of correlations. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(25): 250503
- 33 Luo S. On quantum no-broadcasting. *Lett Math Phys*, 2010, 92: 143–153
- 34 Modi K, Paterek T, Son W, et al. Unified view of quantum and classical correlations. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(8): 080501
- 35 Terhal B M, Horodecki M, Leung D W, et al. The entanglement of purification. *J Math Phys*, 2002, 43(9): 4286–4298
- 36 DiVincenzo D P, Horodecki M, Leung D W, et al. Locking classical correlations in quantum states. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(6): 067902
- 37 Oppenheim J, Horodecki M, Horodecki P, et al. Thermodynamical approach to quantifying quantum correlations. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(18): 180402
- 38 Horodecki M, Horodecki P, Horodecki R, et al. Local versus nonlocal information in quantum-information theory: Formalism and phenomena. *Phys Rev A*, 2005, 71(6): 062307
- 39 Luo S. Using measurement-induced disturbance to characterize correlations as classical or quantum. *Phys Rev A*, 2008, 77(2): 022301
- 40 Werlang T, Souza S, Fanchini F F, et al. Robustness of quantum discord to sudden death. *Phys Rev A*, 2009, 80(2): 024103
- 41 Maziero J, Celeri L C, Serra R M, et al. Classical and quantum correlations under decoherence. *Phys Rev A*, 2009, 80: 044102
- 42 Mazzola L, Piilo J, Maniscalco S. Sudden transition between classical and quantum decoherence. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 200401
- 43 Maziero J, Werlang T, Fanchini F F, et al. System-reservoir dynamics of quantum and classical correlations. *Phys Rev A*, 2010, 81: 022116
- 44 Wang B, Xu Z Y, Chen Z Q, et al. Non-Markovian effect on the quantum discord. *Phys Rev A*, 2010, 81: 014101
- 45 Fanchini F F, Werlang T, Brasil C A, et al. Non-Markovian dynamics of quantum discord. *Phys Rev A*, 2010, 81: 052107
- 46 Nielsen M A, Chuang I L. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 2000
- 47 Berglund A J. Quantum coherence and control in one- and two-photon optical systems. arXiv: quant-ph/0010001v2
- 48 Kwiat P G, Waks E, White A G, et al. Ultrabright source of polarization-entangled photons. *Phys Rev A*, 60(2): 773–776
- 49 Puentes G, Voigt D, Aiello A, et al. Tunable spatial decoherers for polarization-entangled photons. *Opt Lett*, 2006, 31(13): 2057–2059
- 50 Aiello A, Puentes G, Voigt D, et al. Maximally entangled mixed-state generation via local operations. *Phys Rev A*, 2007, 75(6): 062118
- 51 James D F V, Kwiat P G, Munro W J, et al. Measurement of qubits. *Phys Rev A*, 2001, 64(5): 052312
- 52 Bennett C H, DiVincenzo D P, Smolin J A, et al. Mixed-state entanglement and quantum error correction. *Phys Rev A*, 1996, 54(5): 3824–3851
- 53 Vedral V, Plenio M B, Rippin M A, et al. Quantifying entanglement. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(12): 2275–2279

- 54 Yu T, Eberly J H. Sudden death of entanglement. *Science*, 2009, 323(5914): 598–601
- 55 Heisenberg W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Z Phys*, 1927, 43: 172–198
- 56 Kennard E H. Zur quantenmechanik einfacher bewegungstypen. *Z Phys*, 1927, 44: 326
- 57 Robertson H P. The uncertainty principle. *Phys Rev*, 1929, 34: 163–164
- 58 Bialynicki-Birula I, Mycielski J. Uncertainty relations for information entropy in wave mechanics. *Commun Math Phys*, 1975, 44: 129–132; Deutsch D. Uncertainty in quantum measurements. *Phys Rev Lett*, 1983, 50: 631–633; Kraus K. Complementary observables and uncertainty relations. *Phys Rev D*, 1987, 35: 3070–3075; Maassen H, Uffink J B M. Generalized entropic uncertainty relations. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 1103–1106
- 59 Li C F, Xu J S, Xu X Y, et al. Experimental investigation of the entanglement assisted entropic uncertainty principle. *Nat Phys*, 2011, 7: 752–756
- 60 Tomamichel M, Renner R. Uncertainty relation for smooth entropies. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 110506; Tomamichel M, Lim C C W, Gisin N, et al. Tight finite-key analysis for quantum cryptography. *Nat Commun*, 2012, 3: 634
- 61 Prevedel R, Hamel D R, Colbeck R, et al. Experimental investigation of the uncertainty principle in the presence of quantum memory. *Nat Phys*, 2011, 7: 757–761
- 62 Breuer H P, Petruccione F. *The Theory of Open Quantum System*. Oxford: Oxford University Press, 2002
- 63 Haake F, Reibold R. Strong damping and low-temperature anomalies for the harmonic oscillator. *Phys Rev A*, 1985, 32(4): 2462–2475
- 64 Grabert H, Schramm P, Ingold G L. Quantum Brownian motion: The functional integral approach. *Phys Rep*, 1988, 168(3): 115–207
- 65 Štelmachovič P, Bužek V. Dynamics of open quantum systems initially entangled with environment: Beyond the Kraus representation. *Phys Rev A*, 2001, 64: 062106
- 66 Gemmer J, Michel M. Thermalization of quantum systems by finite baths. *Europhys Lett*, 2006, 73(1): 1–7
- 67 Coish W A, Loss D. Hyperfine interaction in a quantum dot: Non-Markovian electron spin dynamics. *Phys Rev B*, 2004, 70: 195340
- 68 Bortz M, Stolze J. Exact dynamics in the inhomogeneous central-spin model. *Phys Rev B*, 2007, 76: 014304
- 69 Michel M, Mahler G, Gemmer J. Fourier's law from Schrödinger dynamics. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 180602
- 70 Gorini V, Kossakowski A, Sudarshan E CG. Completely positive dynamical semigroups of N-level systems. *J Math Phys*, 1976, 17(5): 821–825; Lindblad G. On the generators of quantum dynamical semigroups. *Commun Math Phys*, 1976, 48(2): 119–130
- 71 Liu B H, Li L, Huang Y F, et al. Experimental control of the transition from Markovian to non-Markovian dynamics of open quantum systems. *Nat Phys*, 2011, 7: 931–934
- 72 Barreiro J T. Environmental effects controlled. *Nat Phys*, 2011, 7: 927–928

## Research progress in physics foundation for quantum information

DUAN KaiMin & LI ChuanFeng\*

*Key Lab of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

The combination of quantum mechanics and information science results in the quantum information science. Now, conversely, the progress in quantum information field promotes the progress of quantum physics. Here, we review some recent research progress in physics foundation for quantum information, including the concept of quantum correlation and its application, entanglement-assisted entropic uncertainty principle, environmental control and quantitative research of non-Markovianity in dynamics of open quantum systems.

**quantum correlation, entropic uncertainty principle, environmental control**

**PACS:** 03.67-a, 42.50.Xa, 03.65.Yz

**doi:** 10.1360/132012-607