

量子纠缠 (quantum entanglement)

Ma Hongbao^{1,*}, Margaret Young²

¹ Brookdale Hospital, Brooklyn, NY 11212, USA; ² Cambridge, MA 02138, USA
ma8080@gmail.com

Abstract: 量子纠缠 (quantum entanglement) 是指在由两个或两个以上粒子组成的系统中, 虽然粒子在空间上可能分开, 但是它们仍然相互影响的现象, 即量子关联。一旦两个粒子发生纠缠, 当一个粒子发生变化, 立即在另一个粒子中反映出来, 不管它们是在同一个房间, 还是相距万亿光年。即使这量子纠缠着的粒子相距及其遥远 (远至万亿光年), 它们似乎连在一起, 中间没有空间, 它们之间的联系即信息传输不需要时间。量子纠缠着的粒子之间的空间及粒子间信息传播的方式、时间与速度, 是现在科学最大的谜团。基本的生物化学反应、生命过程、思想思维、精神本质、灵魂存在与否等等, 及其与非生命物质的本质区别是什么? 这依然是未解之谜, 其与量子纠缠的关系, 或许是其中谜底。

[Ma H, Young M. 量子纠缠 (quantum entanglement). *Academ Arena* 2015;7(2):46-50]. (ISSN 1553-992X).
<http://www.sciencepub.net/academia>.

Keywords: 量子纠缠 (quantum entanglement); 粒子; 系统; 空间; 量子; 关联; 信息传播; 时间; 速度; 科学

量子纠缠 (quantum entanglement) 是指在由两个或两个以上粒子组成的系统中, 虽然粒子在空间上可能分开, 但是它们仍然相互影响的现象, 即量子关联。一旦两个粒子发生纠缠, 当一个粒子发生变化, 立即在另一个粒子中反映出来, 不管它们是在同一个房间, 还是相距万亿光年。即使这量子纠缠着的粒子相距及其遥远 (远至万亿光年), 它们似乎连在一起, 中间没有空间, 它们之间的联系即信息传输不需要时间。量子纠缠着的粒子之间的空间及粒子间信息传播的方式、时间与速度, 是现在科学最大的谜团。

按照量子力学理论, 两个粒子在经过短时间耦合后, 即使粒子与粒子之间飞凯并相隔很远的距离, 单独搅扰其中任意一个粒子会影响另一个粒子的性质, 这种关联现象就是量子纠缠。光子、电子、分子及纳米粒子 (Ma, et al, 2007) 等, 都可以观察到量子纠缠现象。由两个以上粒子组成的量子系统也会发生量子纠缠。量子纠缠是一种量子力学看到的现象, 不适用经典力学。复合系统是由多于两个粒子组成的系统, 处于量子纠缠的复合系统, 其态矢量不等于各个粒子的态矢量的张量积, 而是几个不同张量积的量子叠加。因此, 我们不能独立地描述每个粒子的量子态, 只能描述整体系统的量子态 (百度百科, 2015)。

假设, 由两个粒子组成的复合系统处于量子纠缠, 对其中一个粒子做测量得到结果 (比如自旋为上旋), 则另外一个粒子在之后任意时间做测量, 必定会得到关联结果 (比如自旋为下旋)。对于每一个粒子对的两个粒子做测量, 可看到两个粒子的性质存在着关联现象, 尽管它们可能相隔很遥远,

这种关联现象依然存在。两个测量的时间间隔, 比光波传播于两个测量位置所需的时间间隔还短暂 (甚至不需要时间), 由此得出结论量子纠缠的作用速度比光速还快。量子纠缠的作用速度可以比光速快 10,000 倍以上。测量的效应具有瞬时性质。量子力学中不能表示成直积形式的态称为纠缠态。纠缠态对于了解量子力学的基本概念具有重要意义, 已在一些前沿领域中得到应用, 特别是在量子信息方面 (Wikipedia, 2015)。

对量子力学的传统解释的重点是量子假设, 认定微观领域内每个粒子过程中存在着本质的不连续, 把这种不连续的概率理解为是同一个粒子在给定时刻出现在某处的概率密度。通过量子纠缠的理论, 可以对量子力学的系统解释通过构造各种隐变量量子论来寻找量子力学的决定论基础, 即为态函数的概率解释建构决定论的基石, 在微观物理学领域内恢复决定论和绝对因果性, 消除经典世界同量子世界的独特划分, 回到经典物理学的概念, 建立物理世界的统一说明。量子力学的统计解释认为态函数是对统计系统的描述, 量子理论是关于系统的统计理论, 这个系统是由全同的系统组成, 不需要一个预先确定的动力学变量的集合。严格的决定论认为宇宙中一切现象的出现都有一个确定的顺序, 一切都预先确定, 一切都出资必然, 无线远以前的宇宙状态已经严格地确定好了宇宙无限远以后的所有状态。从本体论意义上讲, 决定论是正确的 (马宏宝, 2003; 马宏宝, 2008)。

1935 年 5 月爱因斯坦、波多尔斯基和罗森发表的论文《物理实在的量子力学描述能否被认为是完备的?》(EPR 悖论) 及薛定谔发表的关于量

子纠缠的论文，成为人类量子纠缠研究的开始。量子纠缠是量子力学的基础性质之一。按照 EPR 悖论设想，两个暂时耦合的粒子，不再耦合之后彼此之间仍旧维持着关联。1964 年，贝尔提出量子力学的预测不同于局域性隐变量理论。假若测量两个粒子分别沿着不同轴向的自旋，则量子力学得到的统计关联性结果比局域性隐变量理论强。1972 年，克劳泽与弗里曼首先完成这种检试实验。1982 年，阿斯佩得到的实验结果符合量子力学的预测，不符合局域性隐变量理论的预测，因此证实局域性隐变量理论不成立。量子纠缠不符合相对论对于信息传递所设定的速度极限，量子纠缠的基础机制仍然不清楚，但是量子纠缠理论已在通讯及计算机等领域得到了实际应用。这些年来的研究结果促成了应用这些超强关联来传递信息的可能性，从而导致了量子密码学的成功发展。

爱因斯坦当初坚信一对纠缠态的粒子更像是一双手套。按照爱因斯坦的理解，想像把一双手套分开放置于两只箱子中，然后一只箱子由你自己保管，另一只箱子则放置于地球的另一端，在你开箱以前就知道箱子里放着的手套不是左手就是右手。然后你打开箱子，如果看见左手的手套，在这瞬间，就算没人看过地球另一端的箱子，你也能够知道那里装的是右手的手套。你打开箱子，显然不会影响到另一只箱子里的手套。你身边的这只箱子装着左手的手套，而地球另一端的那只箱子则装着右手的手套，这是在当初分装时就已决定了的。爱因斯坦相信，所谓的纠缠态只不过如此而已，电子的一切状态在它们彼此分离的时候就已经决定了。实际的情况不是如此，它们不是简单的互相决定，而是实际的互相影响。

1967 年，在美国哥伦比亚大学，约翰-克劳泽 (John Clauser) 测量了数以千计的纠缠粒子，然后比较它们的自旋状态，随着结果逐渐揭晓，结果相当惊人，他证明了量子力学的方程是正确的，纠缠是真实的，粒子可以跨越空间连接——对其进行测量或作用，确实可以瞬间影响到它远方的同伴，彷彿跨越了空间的存在。爱因斯坦生前认为不可能的「鬼魅般的超距作用」，确实存在。

EPR 悖论的思想实验：假设一个零自旋中性 π 介子衰变成一个电子与一个正电子，这两个衰变产物各自朝着相反方向移动至区域 A、B。由于量子纠缠，假若位于区域 A 的 X 与位于区域 B 的 Y 分别测量粒子沿着同样轴向的自旋，则 X 会测得上旋且 Y 会测得下旋，或 X 会测得下旋且 Y 会测得上旋。

假设一个零自旋中性 π 介子衰变成一个电子与一个正电子，这两个衰变产物各自朝着相反方向移动，电子移动到区域 A，在那里的观察者 X 会

观测电子沿着某特定轴向的自旋；正电子移动到区域 B，在那里的观察者 Y 也会观测正电子沿着同样轴向的自旋。

两种状况叠加在一起，每一种状况都有可能发生，不能确定到底哪种状况会发生，因此，电子与正电子纠缠在一起，形成纠缠态。假若不做测量，则无法知道这两个粒子中任何一个粒子的自旋。这单态的两个粒子相互反关联，对于两个粒子的自旋分别做测量，假若电子的自旋为上旋，则正电子的自旋为下旋，假若电子的自旋下旋，则正电子自旋为上旋。量子力学不能预测到底是哪一组数值，但是量子力学可以预言，获得任何一组数值的概率为 50%。X 测量电子的自旋，会得到两种结果：上旋或下旋，假若得到上旋，则纠缠态坍缩为第一个项目所代表的量子态。Y 鲍勃测量正电子的自旋，他会得到下旋的概率为 100%。

粒子沿着不同轴向的自旋彼此之间是不相容可观察量，对于这些不相容可观察量作测量必定不能同时得到明确结果。量子纠缠是个非经典现象。不确定性原理的维持必须倚赖量子纠缠机制。一个零自旋中性 π 介子衰变，两个衰变产物各自朝着相反方向移动。分别测量电子的位置与正电子的动量，假若量子纠缠机制不存在，则可借着守恒定律预测两个粒子各自的位置与动量，这违反了不确定性原理。由于量子纠缠机制，粒子的位置与动量遵守不确定性原理。从以相对论性速度移动的两个参考系分别测量两个纠缠粒子的物理性质，尽管在每一个参考系，测量两个粒子的时间顺序不同，获得的实验数据仍旧违反贝尔不等式，仍旧能够可靠地复制出两个纠缠粒子的量子关联。

对于两体纯态，只有冯诺伊曼熵能够量度量子纠缠，因为只有它能够满足某些量度量子纠缠必须遵守的判据。对于混合态，使用冯诺伊曼熵并不是唯一能够量度量子纠缠的方法。假设一个量子系统是由几个处于量子纠缠的亚系统组成，而整体系统所具有的某种物理性质，亚系统不能私自具有，这时，不能够对亚系统给定这种物理性质，只能对整体系统给定这种物理性质，它具有不可分性。不可分性不一定与空间有关，处于同一区域的几个物理系统，只要彼此之间没有任何纠缠，则它们各自可拥有自己的物理性质。量子纠缠是一种物理资源，如同时间、能量、动量等等，能够萃取与转换。应用量子纠缠的机制于量子信息学，很多平常不可行的事务都可以达成：

- 1) 量子密钥分发能够使通信双方共同拥有一个随机、安全的密钥，来加密和解密信息，从而保证通信安全。在量子密钥分发机制里，给定两个处于量子纠缠的粒子，假设通信双方各自接受到其中一个粒子，由于

测量其中任意一个粒子会摧毁这对粒子的量子纠缠，任何窃听动作都会被通信双方侦测发觉。

- 2) 密集编码应用量子纠缠机制来传送信息，每两个经典位元的信息，只需要用到一个量子位元，这科技可以使传送效率加倍。
- 3) 量子隐形传态应用先发送点与接收点分享的两个量子纠缠亚系统与一些经典通讯技术来传送量子态或量子信息从发送点至相隔遥远距离的接收点。
- 4) 量子算法的速度时常会胜过对应的经典算法很多。但是，在量子算法里，量子纠缠所扮演的角色，物理学者尚未达成共识。有些物理学者认为，量子纠缠对于量子算法的快速运算贡献很大，但是，只倚赖量子纠缠并无法达成快速运算。
- 5) 在量子计算机体系结构里，量子纠缠扮演了很重要的角色。例如，在一次性量子计算机的方法里，必须先制备出一个多体纠缠态，通常是图形态或簇态，然后借着一系列的测量来计算出结果。

能量的缓慢散布导致时间流向的不可逆反，但是人们无法观测到时间流向。虽然人们自然地感觉着时间的单一流向并不能改变之，但是所有的物理定律对顺着时间流向或逆着时间流向都没有区别。有一种可能是：量子纠缠是时间流向的源头，时间的流向是关联递加的方向，这机制源自于量子纠缠。微观粒子彼此相互作用产生量子纠缠，因此形成能量散布与平衡的现象，关于微观粒子的信息通过量子纠缠机制，从一至十、从十至百，从百至千，等等，逐步到整个环境，因此显示出时间流向。时间是一种从量子纠缠衍生出来的凸出现象。

纠缠度是指所研究的纠缠态携带纠缠的量的多少。纠缠状态所纠缠的粒子数量越多，对经典物理学的偏离越明显，获得有用量子效应的机会就越大。将两个黑洞纠缠在一起，然后再将它们分离，就可制成一个虫洞连结在它们之间类，纠缠两个夸克也会有同样的作用。引力与它的物理性质不是基础的，而是来自于量子纠缠。虽然量子力学能够正确地描述在微观层次的相互作用，它尚未能够解释引力。从量子引力理论看经典引力不是基础的。从真空生成的纠缠粒子对，处于电场的作用下，可以被捕获，不让它们湮灭回真空。这些被捕获的粒子相互纠缠，可以映射到四维空间。另外的可能是，引力存在于空间的第五维，将三维的时空弯曲与变形。根据全息原理，所有在第五维的事件可以变换为在其它四维的事件，因此，在纠缠粒子被生成的同时，虫洞也被生成，引力与它弯曲时空的能力来自于量子纠缠。

处于纠缠态的两个夸克可以用高维度空间里的弦的两个端点来代表。加拿大维多利亚大学的 Kristan Jensen 和美国华盛顿大学的 Andreas Karch 在研究中设想两个处于纠缠态的夸克相互加速远离对方，直到不再有因果联系。这时联系它们的弦在数学上等价于一个虫洞。从强电场里通过施温格效应 (Schwinger effect) 产生的正负夸克对出发，美国麻省理工的 Julian Sonner 用另一种方法导出了同样的结果。计算发现虫洞的熵等于夸克的纠缠熵，这种与虫洞的联系可能为理解量子纠缠提供新的见解。

爱因斯坦不相信有鬼魅般的连接，而认为在你观察以前，一切就已经决定了。粒子在被观测前就已经决定了自旋状态。波尔则用量子力学方程式表明，相互纠缠的粒子即使相距很远，也可以互相连接。

一个粒子在本质上是一个无限的客体，在不同的过程中有不同的表现。整个宇宙是一个整体的能量惯性体系包括实在的粒子和空间，宇宙中的每一个粒子作为宇宙能量的一分子它本身的能量惯性状态始终与宇宙环境保持一致即能量的稳定性，它们的电磁能量波始终存在着相互作用。当两个粒子同时处于某一状态即尽量使之处于基态或能量控制编码态，它们在相互作用时产生了电磁能量惯性互动及量子纠缠现象。物质具有能量然而人们只能从物质的相互作用中获得并得到利用。如果连接遥远宇宙中存在两个时空的渠道，这可能与量子纠缠有关。在量子力学的理论中，两个粒子不论距离的远近都会形成一定的相互影响。

目前人们有两种不同的理论来研究宇宙，这就是量子力学和广义相对论，两个理论可以分别解释微观的小尺度和宏观的大尺度宇宙时空，但是两种理论无法统一。对于虫洞理论，爱因斯坦广义相对论预言了一种时空通道的存在，即爱因斯坦-罗森桥，这是目前连接两个时空的快速通道理论，量子力学理论也提供类似的现象，可以在两个遥远的粒子间建立联系，这就是量子纠缠。宏观状态的爱因斯坦-罗森桥机制与量子纠缠有何关系呢，科学家现在一直在寻找这个答案。两颗向相反方向移动但速率相同的粒子，即使移动至不同的宇宙星系，在遥远的距离下，它们仍保有关联性，亦即当其中一颗被操作（例如量子测量）而状态发生变化，另一颗也会即时发生相应的状态变化 (Wikipedia, 2015)。

量子纠缠所代表的在量子世界中的普遍量子关联是组成世界的基本的关联关系。量子通讯已被应用于量子态隐形传输，量子计算已被应用于量子计算机，量子保密通讯也已被广泛应用于量子密码术中。一旦两个粒子发生纠缠，不管两个粒子处

于何处，它们彼此之间仍保持着强大的关联，用这种关联可以实现似乎不可能完成的任务。然而，为什么会有这样的纠缠及粒子之间通过什么来完成这个纠缠，则是没有解决的问题。

由于测量导致的波函数塌缩及导致的纠缠的破坏本身的性质，给量子纠缠在通讯上的应用带来了难题。人们可以制造一个纠缠态，足够长的时间后让这个纠缠可以在足够远的空间点之上产生关联，但是一旦测量破坏了态，就不能重新超光速的在这两点之间建立新的纠缠态。要从量子态提取信息，就必须测量，一旦测量，纠缠态就会破坏，因此你如果保持纠缠态，就不能对它进行测量。假设有一个纠缠态存在，在 A 进行测量，波函数塌缩了，这时 B 处的状态的确发生了变化，但由于它本身并不处在一个测量行为中，否则波函数之前就塌缩了，因此在 B 处不可能实时得知这个变化，所以一般认为量子通信真正的优势不是超光速，而是其保密性。理论上信息传递过程中是绝对安全的，对手最多可以破坏通信，但是绝对无法截获通信内容。

量子纠缠在通讯上应用的问题，即使疑问重重的问题，又是极具诱惑的问题。

按照当代的宇宙论理论，宇宙诞生之前，没有时间，没有空间，也没有物质和能量。大约 200 亿年前，在这四大皆空的“无”中，一个体积无限小的点爆炸了。时空从这一刻开始，物质和能量也由此产生，这就是宇宙创生的大爆炸。现代宇宙论认为，宇宙不可能有无限的未来，而是在某个有限的时间之前诞生的，并在一个有限的将来衰亡。爆炸是空间、时间、物质与能量的起源。这些概念都不能外推到大爆炸之前。大爆炸之前发生了什么，是什么引起了大爆炸，这些问题至今无法回答(马宏宝, 2008b)。

量子纠缠是量子信息处理中的一种重要的有用资源,有许多应用,比如量子态的隐形传送,密集编码以及基于量子纠缠的密钥传送方案等.量子纠缠也可以用于量子态的远程制备(RSP),与隐形传送不同的是在非最大纠缠态的帮助下也可以进行确定性的远程态制备.量子纠缠和量子操作有着非常紧密的关系.子非定域操作能够产生纠缠态.另一方面,量子纠缠态可以用来实现非定域的量子操作.量子操作和量子纠缠一样被看成是一种物理资源().子纠缠网络是经典网络的量子化,即引入量子力学的叠加性和非局域性.量子纠缠网络的主要构成包括量子节点、量子信道和飞行比特.其中飞行比特(一般是光子)可以处在量子纠缠态,这是量子网络独特性质.量子纠缠态在量子信息处理,如量子隐形传态、量子密集码、量子纠错、量子保密通信、量子计算等过程中起了十分重要的作用.

光合作用是地球上最重要的生化反应。它负责将光，空气，水和少量矿物质转变成草，树木，粮食以及以植物或食草动物为食的我们。起初是由叶绿素分子捕获光能。该光能被转化为电能，然后这些电能将被输送到被称为反应中心的生化工厂，在那里它们被用来固定二氧化碳并将其转化成植物物质。长期以来，这种能源运输的过程让研究者们着迷，因为它可以如此高效——接近 100%。量子纠缠在宇宙自然中具有重要的意义，比如地球生命的奇特过程可能与量子纠缠有关。据美国研究者对光合作用中的量子纠缠的记录并量化表明，在绿色植物中的光合作用中，量子纠缠是量子力学效应的一种自然属性，量子纠缠能够在生物系统中存在并且持续一段时间。绿色植物通过光合作用将太阳能转化为化学能，其转化效率接近 100%。光合作用高效率的关键在于传递速度。光合作用得到的量子力学效应是绿色植物的一种关键能力，它可以瞬时地将捕光复合物分子中的太阳能传输给光电反应中心的复合物分子，完成能量的转移。在绿色植物的光合作用中，量子纠缠是量子力学效应的一种自然属性，量子纠缠能够在生物系统中存在并且持续一段时间。研究人员在大量 FMO 复合物中发现了量子纠缠存在的证据，这些纠缠的持续时间一般为几皮秒，并会持续穿过大约 30 埃的距离，直到激发能被反应中心捕捉到。这个持续时间很长的、非平衡的纠缠也会出现在如紫色光合细菌 LH1 和 LH2 等更大的捕光化合物中，而更大的捕光化合物也能够制造和支持更多的激发能来获得更多样的纠缠状态。量子纠缠持续地存在于离散的捕光复合物的分子之间，而且温度对纠缠程度的影响微乎其微。在量子信息领域，温度通常被认为对纠缠等量子特性非常不利，但是，在诸如捕光化合物的系统中，量子纠缠或可免受温度升高带来的影响。(刘霞, 2010)。

细胞是生物体的基本功能单位，具有自我复制并进行传种接代的功能。细胞是一个高度有序的结构体系，它可以与外界进行物质和能量上的交换。病毒生物体的一切生命现象，如生长、发育、繁殖、代谢和应激等，本质上都是由细胞单位的活动来体现并完成的。地球生命是可以自我复制自我繁衍的物质存在 (Ma and Cherng, 2005)，通过干细胞的自我更新及分化不断延续 (Ma and Chen, 2005; Ma and Cherng, 2007)。地球上的生命个体，到底有没有可能达到生物学上的永生？有一种生物叫做灯塔水母(Turritopsis nutricula)，就有可能具有永生的生物学特性 (Ma and Yang, 2012)。基本的生物化学反应、生命过程、思想思维、精神本质、灵魂存在与否等等，及其与非生命物质的本质区别

是什么？这依然是未解之谜，其与量子纠缠的关系，或许是其中谜底。

References

1. 刘霞. 科技日报. Nature Physics : 解密植物光合作用中的量子纠缠 . <http://www.bioon.com/biology/integrated/442863.shtml>. 2010.
2. Hongbao Ma, George Chen. Stem cell. The Journal of American Science 2005;1(2):90-92. <http://www.jofamericanscience.org/journals>.
3. Hongbao Ma, Shen Cherng. Nature of Life. Life Science Journal. 2005: 2(1):7-15. (ISSN: 1097-8135). <http://www.sciencepub.net/life/life0201/life-0201-03.pdf>.
4. Hongbao Ma, Yan Yang. Turritopsis nutricula. Nature and Science 2010;8(2):15-20. (ISSN: 1545-0740). http://www.sciencepub.net/nature/ns0802/03_1279_hongbao_turritopsis_ns0802_15_20.pdf.
5. Hongbao Ma. The nature of time and space. Nature and Science 2003;1(1):1-11. <http://www.sciencepub.net/nature>.
6. Ma Hongbao, Cherng Shen. Eternal Life and Stem Cell. Nature and Science. 2007;5(1):81-96. <http://www.sciencepub.net/nature>.
7. Ma Hongbao, Horng Deng-Nan, Cherng Shen. Colloidal Silver. The Journal of American Science. 2007;3(3):74-77. (ISSN: 1545-1003). <http://www.jofamericanscience.org/journals>.
8. Wikipedia. 量子纠缠. <http://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E9%87%8F%E5%AD%90%E7%BA%A0%E7%BC%A0>. 2015.
9. 百度百科. 量子纠缠. <http://baike.baidu.com/view/95051.htm>. 2015.
10. 马宏宝 (b) . 宇宙永恒吗? New York Science Journal. 2008;1(3):66-69. ISSN 1554-0200. http://www.sciencepub.net/newyork/0103/07_0026_mahongbao_universe.pdf.
11. 叶明勇, 张永生, 郭光灿. 量子纠缠和量子操作. 中国科学 G 辑: 物理学 力学天文学 2007 年 第 37 卷 第 6 期: 716-722.
12. 马宏宝. 论因果论与决定论. New York Science Journal. 2008;1(4):57-63. ISSN 1554-0200. <http://www.sciencepub.net/newyork>.
13. 量子纠缠网络组主要研究方向. <http://lqcc.ustc.edu.cn/news/?column=33>. 2015.

2/15/2015