

# 爱因斯坦与玻尔有关量子理论的旷世争论宣告终结\*

(中国科学院上海光学精密机械研究所 石云 编译自 Alain Aspect. *Physics*, December 16, 2015)

三个关于贝尔不等式的实验测量，同时堵住了局域性漏洞和探测器漏洞。这些实验排除了最后的疑问，宣告了对局域唯实论彻底的放弃，同时也开启了通往新量子信息技术的大门。

1935年，爱因斯坦(Albert Einstein)和 Boris Podolsky、Nathan Rosen(EPR)三人写了一篇至今仍非常有名的文章，质疑了量子力学理论的完备性。他们不认为纠缠对其中一个粒子的测量会影响远处另一个粒子的态，并认为：量子理论是不完备的，为了得到一个关于世界的合理的“局域唯实论”的描述，就必须补全量子理论的形式。他们认为一个粒子在局域范围内携带了其全部性质，对其进行测量的所有的结果构成粒子的物理真实。

1964年，一位在欧洲核子中心的理论物理学家贝尔，发现了一个不等式，即著名的贝尔不等式。这个不等式，可以用实际实验测量来对比局域唯实论与标准量子物理的不同预测。也就是说，人们可以设计一个实验，测量贝尔不等式中某些要求的参数。如果测量结果符合贝尔不等式，那么就证明局域唯实论是正确的，量子物理理论是不完备的；如果测量结果不符合贝尔不等式，则量子物理理论是完备的，局域唯实论是不正确的。

在接下来的几十年内，实验物理学家设计了各种精巧的测试方法来检验贝尔不等式。所有这些实验都趋向于证明量子力学理论是完备的。但其中仍然存在某些漏洞，必须补上一个额外的合理的假设，获得的实验结果才能完全判定局域唯

实论是错误的。

而最近三个研究小组的工作同时堵上所有的漏洞，分别独立证实：量子力学理论是完备的，我们必须明确地放弃局域唯实论。虽然他们的发现并不特别令人感到意外，但其中包含了几十年的实验努力，而且这些结果也为几个基础量子信息研究方案奠定了更坚实的基础，因此还是令人振奋。

毋庸置疑，爱因斯坦在量子物理早期的发展中扮演了重要的角色。他是第一个完全理解机械振荡的能量量子化所带来的结果的人，并在他1905年发表的那篇著名的文章中引进了“光量子”术语。之后，在1909年，他清晰地阐释了光的波粒二象性的本质。尽管他具有深邃的理解力，仍然越来越不满足于玻尔在“哥本哈根解释”中发展的量子理论，同时他也尝试找出海森堡不确定性关系中的矛盾。在1927年的索尔维会议上，玻尔利用单个量子粒子的思想实验，成功反驳了爱因斯坦对哥本哈根解释的质疑。

1935年，爱因斯坦提出了针对哥本哈根解释的新反驳，这次是关于两个粒子的思想实验。他发现量子理论形式上允许两个粒子处于一种纠缠态，并可以预测两个粒子测量结果之间的强关联。

我们知道，光速是宇宙间最快

的速度，信息传输应该不会比光速快。而量子理论预言，处于纠缠态中的两个粒子的关联可以比光速传输更快。

爱因斯坦认为根据局域唯实论这是不可能的，因此提出他认为唯一合理的描述，即处于纠缠中的粒子对中任何一个在分开的时刻就已携带了某种关联特性，以此决定了测量的结果。由于每个纠缠粒子的特性在量子理论中不能分开描述，因此爱因斯坦认为量子理论的形式是不完备的。玻尔却强烈反对这个结论，并坚信不可能在不破坏自洽性的同时给出量子理论的完备形式。

除了薛定谔外，大多数物理学家都没有特别在意玻尔与爱因斯坦之间的争论，因为冲突只是针对量子理论形式的理解，而非挑战量子理论所预测的测量结果。直到贝尔做出那个突破性发现时，人们才意识到，量子物理的一些预测与爱因斯坦的局域唯实论观点之间存在严重冲突。

参考图中真实的实验将有助于我们理解贝尔的发现：图中一对光子的偏振性在两个分离的检测站中被测量，对于图中两个偏振光子的纠缠态而言，量子理论预测在远处两个位置针对两个光子的偏振态的测量存在强关联。为了描述这些关联，光子对中的每一个都被赋

\* 本文转载自公众微信号《赛先生》2016年1月8日的译文，发刊前略做删减。

予同样的性质，贝尔发展了一套普遍的局域唯实论机制来预测测量的结果。

在我们现在称之为贝尔不等式的公式中，贝尔指出，对于任何根据局域唯实论得出的预测，都存在对所预测的相关性的限制。同时他也认为，根据量子力学的结论，通过一些偏光镜的设置，这些限制可以被突破。这意味着不仅在对量子理论形式的理解上局域唯实论与量子力学相冲突，而且双方在实验结果的预测方面也有冲突。

贝尔的发现将爱因斯坦与玻尔的争论从认知论转移到了实验物理的真实地带。几年之后，贝尔不等式便被改造成了一个实际的实验方案。1972年，加州大学伯克利分校

和哈佛大学完成了第一个实验，接着1976年，德克萨斯州农工大学也完成了同样的实验。

尽管最初出现一些与量子力学的轻微的不符，但随后的结果开始支持量子力学，其结果与贝尔不等式有高达6个标准差的背离。尽管这些实验代表了当时最高水平的实验技术，但还远不够理想，一些漏洞仍然存在。这使得爱因斯坦观点的坚定拥护者仍可以用局域唯实论的观点来理解这些实验。

第一个漏洞便是局域性漏洞，这也是贝尔认为最根本的漏洞。为了证明贝尔不等式，贝尔必须假定光子通过一个偏振片的测量结果不依赖于另一个偏振片的取向，这就是所谓的局域条件，这是一个合理

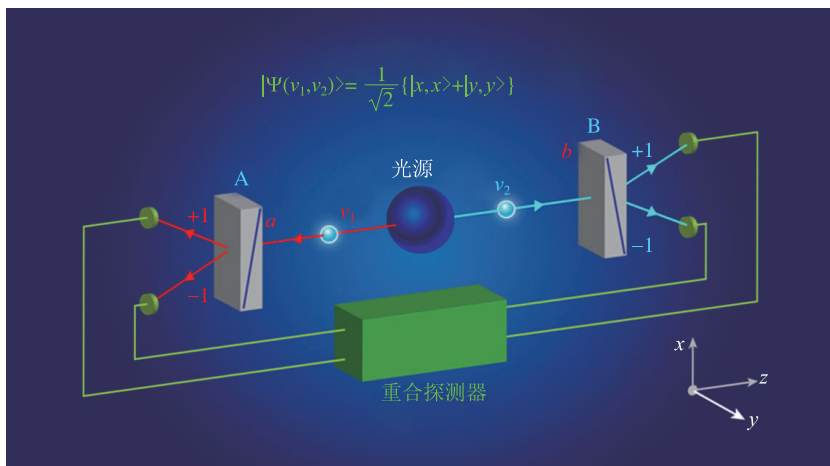
的假定。

贝尔提出了一个方法：要求每个偏振片的方向都在光子离开光子源向探测器飞行期间选定。那么根据相对论因果律，即没有什么作用可以比光传播更快，就会阻止一个偏振片知道另一个偏振片在测量时刻的偏向，从而消除了局域漏洞。

这正是我和我的同事1982年在法国国家科学研究中心光学研究所所做的一个实验，其中偏振片的取向选定是在光子飞行期间快速变化的。但即使采用这种全新的、严密的实验方案，我们仍然发现实验结果与量子理论预测吻合得很好，与贝尔不等式有6个标准偏差的背离。不过由于技术限制，我们实验室中偏振片的取向选定并不是完全随机的。1998年，Innsbruck大学的研究人员可以用完全随机数产生器和质量纠缠光子源来完成该实验。他们观测到了对贝尔不等式几十个标准差的背离。

然而还有第二个漏洞。这与一个事实有关，即所有实验中探测到的光子对都只占出射光子对中很小的一部分，而这小部分可能依赖于偏振片的设定。为了证明实验结果真的背离了贝尔不等式，我们还必须加一个合理的“公平抽样”假设。为了排除这个“探测漏洞”，从而消除添加公平抽样假设的必要性，测量的总体量子效率或传输效率必须超过2/3，即当光子对中的一个已确定被探测到时，另一个光子被探测到的概率必须超过2/3。

2013年，利用最新型光子探测器，有两个小组的实验堵上了这个探测器漏洞，并清楚地证明实验结果突破了贝尔不等式的限制。探测



用于贝尔测试的一个装置。光源发射出一堆纠缠的光子对 $v_1$ 和 $v_2$ 。它们的偏振态由偏振片A和B(灰色方块)分析。它们的偏振方向分别沿着 $a$ 和 $b$ 。每个偏振片有两个输出通道，分别标记为+1和-1。一个光子 $v_1$ 的偏振如果平行(或垂直) $a$ 将在A中出现为+1(或-1)的结果。同样，一个光子 $v_2$ 的偏振如果平行(或垂直) $b$ 将在B中出现为+1(或-1)的结果。这里讨论的两个偏振光子的纠缠态 $\Psi$ ，量子理论预测测量的结果完全是随机的。但同时也预测这些随机结果之间具有强关联性。例如，如果两个偏振片都取向同一个方向( $a=b$ )，那么在A、B的测量结果就只能为(+1, +1)或(-1, -1)，但不可能是(+1, -1)或(-1, +1)。这种全相关系数，可以通过四重检测电路(绿色部分)得到的四个测量电流的比率来确定。局域唯实论是通过假定两个光子之间有一个共同性质，但每个光子对的值是随机来解释这些关联。贝尔不等式表明，采用局域唯实论所预测的关联系数有一个特定的范围。而用量子理论预测的测量结果会突破该不等式的范围。贝尔测试包括对两个光子关联系数的测量，然后用其结果与贝尔不等式进行比较。为了完成理想的贝尔测试，偏振片的取向设置必须在光子穿行于光源与偏振片之间时进行随机改变，而探测器效率应该超过2/3

器漏洞也可以用其他量子纠缠系统来解决，特别是利用离子来替代光子，但这些实验都无法同时解决局域漏洞。

直到两年前，局域漏洞与探测漏洞才被分别独立地排除了，而能在一个实验中同时排除两个漏洞将是一个了不起的进展。这一进展由 Ronald Hanson(荷兰的 Delft 科技大学)、Anton Zeilinger(奥地利的 Vienna 维也纳大学)和 Lynden Shalm(科罗拉多州 Boulder 的 NIST 国家标准与技术研究院)领导的小组在最近完成了。

其中 Vienna 和 NIST 小组的实验方案如图所示。这两个小组都使用了取向可快速变换的偏振片，并放置在离光源足够远处来排除局域漏洞；都使用了高效光子探测器来排除探测漏洞。他们利用一个非线性晶体将泵浦光子转换为两个纠缠光子来制备光子对。两个光子被送往不同的探测站，每个探测站由一个高效单光子探测器和其前面的可通过新型随机数产生器来调节偏振方向的偏振片构成，我们称其为偏振分析器。

这两个小组的实验达到了前所未有的高探测概率，使得一个光子被其分析器探测到时，其同伴光子也同时被另一个分析器探测到。结合探测器的高的固有探测效率，两个实验的传输效率都高达 75%，高于前面提到的 2/3 的阈值。

作者通过计算在局域唯实模型中统计涨落产生同样观测背离的概率  $p$ ，来评估他们测量的结果与贝尔不等式背离的置信度。Vienna 小组给出了惊人的  $3.7 \times 10^{-31}$  的概率值  $p$ ，这一数值对应于 11 个标准差的背离。NIST 小组给出了同样令人信

服的  $2.3 \times 10^{-7}$  的概率值  $p$ ，对应 7 个标准差的背离。

Delft 小组使用了不同的方案。他们的纠缠方案包括两个分别放在不同的实验室中的氮空穴(NV)色心。在每个 NV 色心中，一个电子的自旋与其出射光子相关。

出射光子被送往放有 NV 色心的两个实验室之间的一个探测站。两个光子通过光束分光器混合，然后在分光器的两个输出端被同时探测，这个过程使得远处 NV 色心的电子自旋构成纠缠。当在分光器的两个输出端检测到光子同时出现的信号时，研究人员同时记录自旋分量之间的关联测量，并将关联测量结果与贝尔不等式进行比较，因为每个纠缠信号都是两个自旋分量测量的结果，这一方案使得探测漏洞被排除。两个实验室间 1.3 km 远的距离让自旋分量的方向测量可以独立于纠缠事件，从而排除了局域漏洞。

不过这一方案可观测到的事件数非常稀少，使得 Delft 小组得到观测结果与贝尔不等式偏差的置信度的概率  $p$  为  $4 \times 10^{-2}$ ，对应于 2 个标准方差的偏差。

Vienna, NIST 和 Delft 三个小组验证贝尔不等式的实验方案对于量子信息有着重要的影响。例如，一个无漏洞的贝尔不等式测试可以确保不依赖设备的量子密码方案的安全性能。而 Delft 小组的实验更可以实现静态纠缠量子比特，为长距离量子网络提供了基础。

当然我们需要牢记，这些实验首要任务是了解决爱因斯坦与玻尔关于量子力学观点的冲突。那么现在我们可以认为局域唯实论是完全错误的呢？毫无疑问，我们

已经获得了目前看来关于贝尔不等式最完美的实验结果了。但无论它如何完美，仍然不可以被称为完全没有漏洞。

比如在纠缠光子实验中，我们可以认为光子的性质是在发射前由晶体所决定，从而与前面提到的合理假设矛盾。在不违背相对论因果律条件下，随机数产生器也可能被光子的性质所影响。这些假设尽管很牵强，但残余的漏洞却不能被忽视，仍然需要设计各种方案来解决它。

与物理学中一般的推理方式不同的是“自由意志漏洞”。它的基本想法是：根据相对论因果律，我们认为偏振片的取向选定是相互独立的，但事实上，由于所有事件当在时间上返回到足够远时都有一个共同的过去，这个取向选定也许与它们共同的过去事件存在着关联。

当然，所有观测到的关联都可以动用这样的解释来辩护，而采用这样的极限逻辑意味着人类并不拥有自由意志。这意味着两个科学家即使相隔很远的距离也不能说他们能完全独立地选择测量装置的设定。

贝尔的基本假设中让科学家拥有自由意志来随意选择他们偏振片的设定，有时被指控为是形而上的观念。贝尔如此回应道：“我的确因为陷入这个形而上的假设而感到不安，但我而言，整件事中我只是在尽职做好理论物理。”为了避免任何观察到的相关性都被用作这种特设的解释，我愿意与贝尔站在一起，谦卑地宣告“我只是在尽职做好我的实验物理”。